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

井上　澄貴[1]・宮田　光晴[2]・池田　哲雄[3]・地福　賢[4]
竿代　矢須子[5]・大垣　賀津雄[6]・下前　照[7]

[1]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

[2]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

[3]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

[4]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: jifuku@compotec.jp

[5]コムテック　輸入・企画部（〒651-0086 兵庫県神戸市中央区磯上通 6-1-1）
E-mail: saoshiro@compotec.jp

[6]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

[7]学生会員　ものつくり大学　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: b01512097@iot.ac.jp

海浜部等の厳しい腐食環境に耐えられる材料の候補の１つとしてガラス繊維強化プラスチック(以下，GFRPと呼ぶ)が注目されており，橋梁の製作・施工事例が見られるようになってきている．近年，筆者らはGFRP製のBOX桁構造の歩道橋を製作している．このFRP橋梁は，Vacuum Infusion(VI)法により成形したGFRP部材を接着剤で接合して製作したものであり，床版と主桁が一体になったBOX桁構造である．

このような方法で製作した FRP 橋梁の耐荷力に関する研究事例は少ない．そこで，実橋の 1/2 スケールで製作した FRP 橋梁供試体について，終局状態を迎える際の耐荷力と破壊状況を調査し，設計段階で想定した安全性が確保できているかを確認することを目的に，曲げ載荷試験を実施した．また，支点付近の終局強度を確認するため，せん断載荷実験を実施した．本文はこれらの内容を報告するものである．

Key Words: *GFRP, vacuum infusion, box girder, bending load capacity, shearing load capacity*

1. はじめに

GFRP(Glass Fiber reinforced plastics)部材集成 BOX 桁橋は，VI（Vacuun Infusion）法により製作した積層成形材を接着樹脂で接合して箱断面に集成した橋梁である．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 [1),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．**図-1** にその適用事例と断面形状を示す．

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事例は比較的多くある [3)]．また，引き抜き成形された部材を用いた GFRP 橋の施工実績や研究事例も数多く見られる [4)-10)]．

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 積層成形材を集成した BOX 桁歩道橋が沖縄県浦添市に建設された（**図-2** 参照）．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，VI 法による積層材を接着樹脂で接合集成した BOX 桁橋に関する載荷実験等の研究事例は見当たらない．そこで，浦添大公園橋の施工前に，本橋の曲げ耐荷力やせん断耐荷力を調査するため，実橋の 1/2

スケール断面の供試体の載荷実験を行った．これらの静的載荷実験により，変形性状，終局強度，および破壊状況を確認し，安全性等を照査することとした．

2. 実験概要

(1) 実験供試体

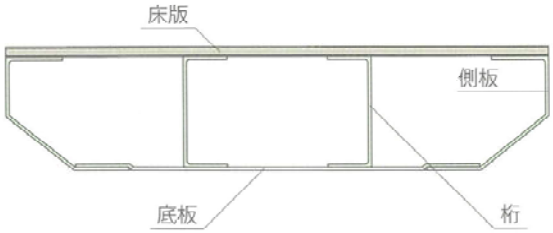
本実験に用いる供試体は，**図-3** に示すような支間長6m，GFRP 部材厚 6mm（床版は 2 ㎝）で，実橋と同様のキャンバーのある GFRP 集成 BOX 桁橋である．断面寸法や板厚は実橋の 1/2 サイズである．実橋では 17.5m の支間長であるが，供試体の長さは 6.3m として，等曲げ載荷を行った．また，支点付近の耐荷力を調査するため，桁端部のせん断力を卓越させた載荷を行うことにより，断面の終局強度を評価するものとした．

(2) 曲げ載荷実験

3000kN 万能載荷試験機を用いて，**図-4,5** に示すように，2 点載荷の 4 点曲げ載荷実験を行い，床版や桁が終局状態を迎える際の耐荷力と破壊状況を調査する．本実験は，設計段階で想定した安全性が確保できているかを確認することを目的として実施したものである．

実験ではキャンバーのある GFRP 集成 BOX 桁供試体の支間中央から両側 500mm に設けた 2 点へそれぞれ均等に荷重を加えていき，終局までの変位やひずみを荷重 10kN 増分ごとに測定した．事前に行った実験準備として，供試体へ正確に荷重が伝達するように支承部にモルタルにて不陸調整を行った．ピンは片側を固定もう一方を可動とした．次に，**図-6** に示すように，万能載荷試験機のヘッドに載荷梁を固定し，供試体上部の支間中央から両側 500mm の 2 点へ均等に荷重が作用できるように載荷点を設置する．支承部と同様に一方を固定もう一方

a)ダンツマディール橋（オランダ）



b)断面形状と部材構成

図-1 GFRP 部材集成 BOX 桁橋の適用例と断面形状 [1)2)]

図-2 浦添大公園歩道橋

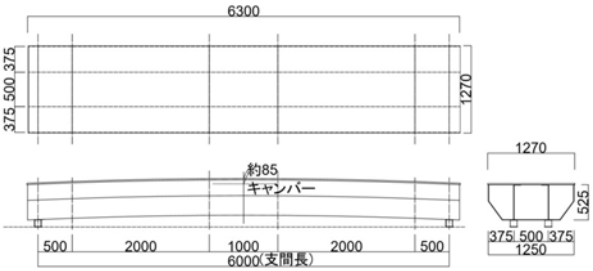


図-3 GFRP 集成 BOX 桁橋供試体

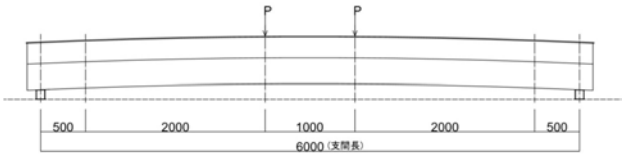


図-4 曲げ載荷実験

図-5 曲げ載荷実験状況

を可動とし，こちらもモルタルを使って不陸調整を行った．

実験供試体のキャンバーは，曲げ実験載荷中，**図-3** に示したように支間中央の 85mm あったキャンバーが，ほとんどなくなるくらい変形する（**図-7** 参照）．この対策として，支点や載荷点はピン支承としている．

また，供試体にひずみゲージ(1 軸ゲージ:86 本，2 軸ゲージ:36 本)と変位計(ケーブル式:1 ヶ所，100㎜式:3 本，50㎜式:18 本)を取り付けて，実験中の挙動を計測した．

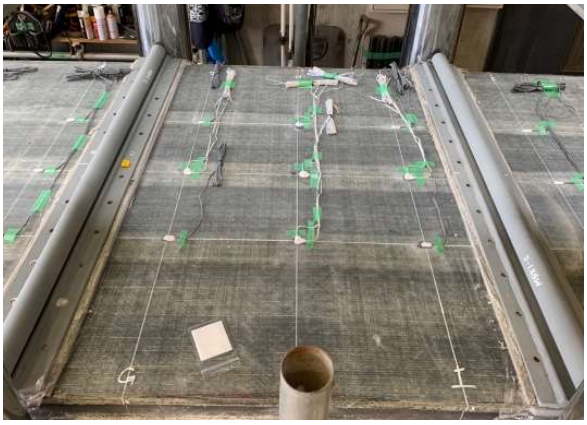
(3) せん断載荷実験

同様に万能載荷試験機を用いて，**図-8** に示すように，1 点載荷の 3 点曲げ載荷を行い，桁もしくは支点上ダイヤフラムが終局状態を迎える際の耐荷力と破壊状況を調査した．本実験の目的は，上述と同様に設計段階で想定した安全性の確認である．

本実験では，**図-8,9** に示すような支間長 2.5m，板厚 6mm(床版のみ 2cm)であり，曲げ載荷実験で用いたキャンバーのある GFRP 集成 BOX 桁供試体の生き残った側の部材で，支点より 500mm の位置に載荷点を設け，荷重を加えていき終局までの変位やひずみを荷重 10kN 増分ごとに測定した．

事前に行った実験準備として，6.3mの実験供試体中央から 500mm 位置のダイヤフラムと中主桁ウエブ交差部直下に，2 液混合の接着剤を使用して**図-10a)** に示す通り支承を取付けた．また，曲げ載荷実験と同様に，供試体へ正確に荷重が伝達するよう支承部にモルタルにて不陸調整を行った．ピン支承は片側を固定もう一方を可動と

a)載荷梁の設置



b)載荷点の設置

図-6 載荷梁，載荷点の設置状況

a)載荷前

⇓

b)載荷中

図-7 実験供試体のキャンバー

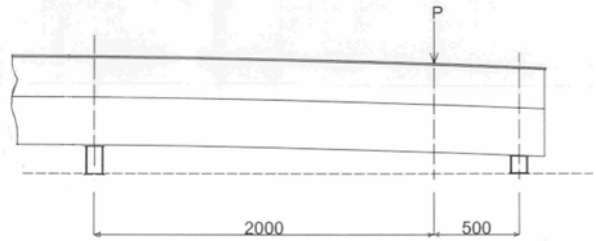
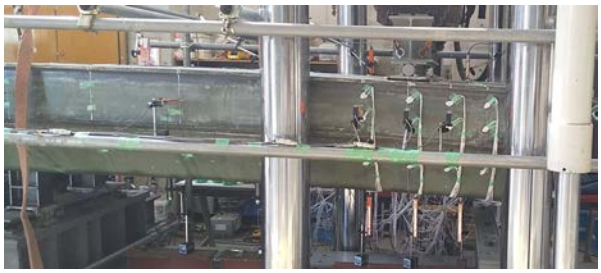
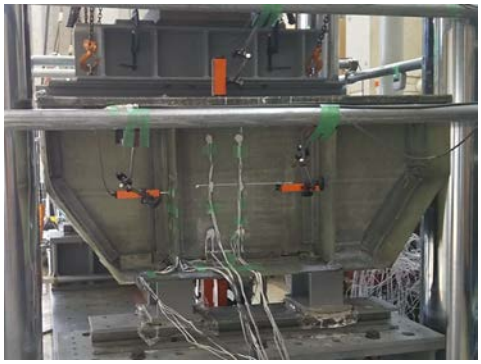


図-8 せん断載荷実験



a)側面



b)端支点部

図-9 せん断実験載荷状況

した．次に，図−10b) に示すように万能載荷試験機のヘッドに H 鋼を固定し，供試体端支点から 500mm 位置の支点上ダイヤフラムを通じて支承に荷重伝達するようにした．

供試体にひずみゲージ(1 軸ゲージ:29 本，2 軸ゲージ:42 本，3 軸ゲージ:12 本)と変位計(100 ㎜式:3 本，50 ㎜式:18 本)を取り付け，結線した．図−11 に示す通り，主桁の端部と端支点上ダイヤフラムや中主桁端部ウエブの載荷点近傍にひずみゲージを設置した．

3. 曲げ載荷実験結果

(1) 破壊状況

荷重が上昇するに従って鉛直変位が増加し，700kN に到達して鉛直変位が 75mm に達し，供試体は図−7 に示した通りキャンバーがなくなりほぼ水平となった．その後，「パンパン」というはく離する時に発生する音が鳴り，その後も荷重をかけたところ 722kN 載荷時に大きな破裂音とともに破壊した．

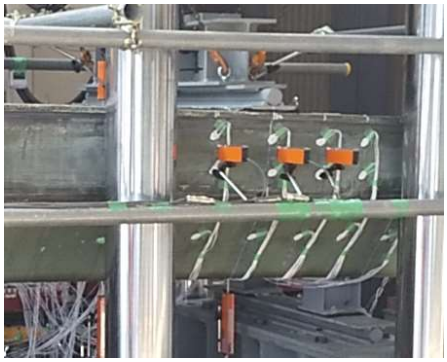
破壊は正面から見て、右側の載荷点のすぐ右横で発生した．また，その破壊位置で図−12a) に示す通り床版と主桁ウエブの接着が剥がれ，床版が大きく盛り上がった状態になった．

その後，丸ノコで破壊箇所上部の床版を切断して撤去し，床版切断面を確認したところ，図−12b) に示す通り切り取った床版には水平割れが発生しており，その部分で切り開いたところ床版内部にはく離面が見られた．この面に付着を阻害するシート系のものが挿入されていた可能性が見られる．また，内主桁ウエブを確認したところ，図−13 に示す通りすべての主桁の上フランジ側が横座屈して破壊に至っていた．

a)供試体中央部に追加した支承

b)桁端部付近の載荷点

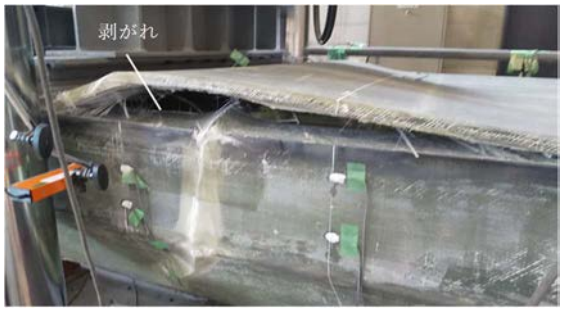
図−10　支承，載荷点の設置状況



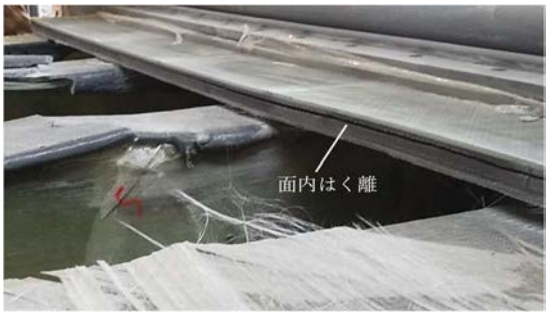
a)桁端部主桁の計測状況

b)桁端部主桁中ウエブの計測状況

図−11　桁端部の計測状況



a)主桁と床版のはく離



b)床版の切断面のはく離

図−12　床版の破壊

(2) 鉛直変位計測結果

図-14 に荷重と支間中央の鉛直変位の関係を示す．今回の実験で供試体中央部に設置した変位計の測定値をグラフにしたものであり，4 点すべて同程度の値であり，最大鉛直変位は約 80 ㎜であった．この際の最大荷重は 722kN であった．また，同図 b)には梁理論による計算値，**図-15** に示すような荷重 FEM による解析値，および本実験の実測値をまとめて示す．同図より，事前に行ったガラス繊維の曲げ引張強度から求まる最大荷重の解析と比べて半分以下の値であった．

解析値と計算値は比較的近い値であるが，解析値が計算値よりも大きな鉛直変位になっているのは，FEM 解析では曲げ変形だけではなくせん断変形が考慮されることや，GFRP 板の異方性も考慮しているためせん断変形が大きくなることが原因であると考えられる．

これら結果から，計算値よりも実際の橋梁の方が剛性は高く，たわみが小さくなるといえる．その理由として，計算や解析においては，接着樹脂の強度を見込んでいないことや，上下フランジ部の板同士の接着部における計算に用いている板厚 6mm は，実質上 2 倍になることなどが原因であると考えられる．

また，**表-1** に実橋の設計曲げモーメントおよびたわみ限界の値，実験供試体にけるこれらに相当する計算値，床版破壊時と最大荷重時の実験値を比較し，床版破壊時

図-13 主桁の曲げ破壊状況

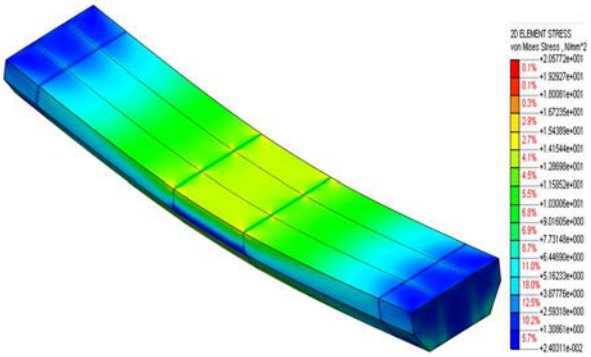
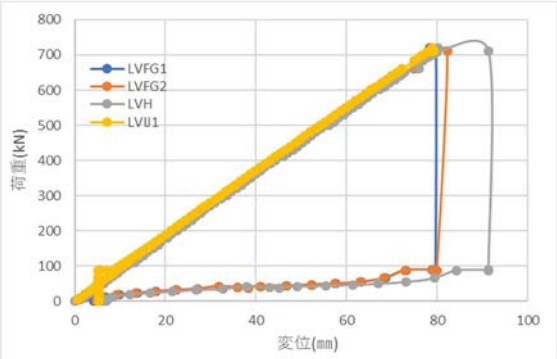
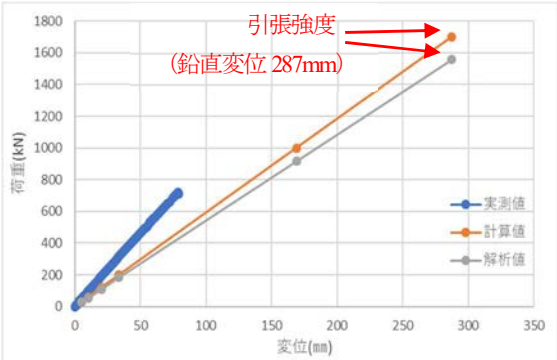


図-15 FEM 解析モデル(鉛直変位 287mm の状態)



a)計測結果(4 点)



b)計算値，解析値との比較

図-14 荷重と支間中央鉛直変位の関係

表-1 曲げ載荷実験結果一覧

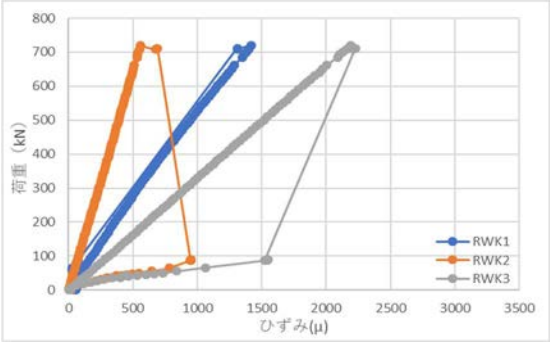
項目		載荷荷重 kN	曲げﾓｰﾒﾝﾄ kNm	鉛直変位 (たわみ)mm	備考
実橋	設計最大曲げﾓｰﾒﾝﾄ時計算値	―	594	78	
	設計たわみ限界時計算値	117	221	29	
実験供試体	設計最大曲げﾓｰﾒﾝﾄ時計算値 P_{DA}	119	149	20	$P_{max}/P_{DA}=5.9$
	設計たわみ限界時計算値 P_{DB}	44	55	7	$P_{max}/P_{DB}=15.9$
	たわみ(L/600)限界時計算値 P_{DC}	60	75	10	$P_{max}/P_{DC}=11.7$
	GFRP 板曲げ引張強度限界計算値	1762	2203	290	
	GFRP 板曲げ引張強度限界解析値	1590	1988	290	
	床版破壊時実験値 P_{max}	700	875	77	
	最大荷重(上フランジ横座屈)実験値	722	903	80	

の強度に対する設計計算値の安全率を示した．その結果，設計モーメントに対して 5.9 倍，設計限界たわみに対して 15.9 倍の安全率を有していることがわかった．

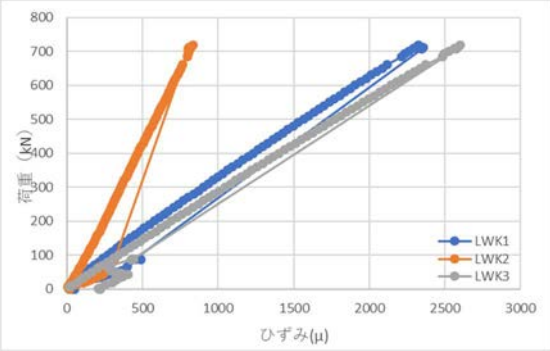
(3) ひずみ計測結果

図−16～18 に荷重と破壊箇所近傍のひずみの関係を示す．右側載荷点近傍の破壊箇所付近におけるひずみを記載した．右側ウエブの軸方向ひずみ(図−16,17a))では，最大荷重に到達した後に荷重が 722kN から 711kN に若干低下し，ひずみが増加していることがわかる．一方，左側ウエブ(図−16,17b))のほとんどの測定点では，荷重が 722kN から 711kN に若干低下した時のひずみ変化は少ないことがわかる．このことから主たる破壊は，右側ウエブで生じたことがわかる．

また図−18 より，上フランジの載荷点右側破壊箇所（図−7 参照）において，荷重が 722kN から 711kN に低下した時は，ひずみが 4000μ から 2000μ 近く低下していることがわかる．これは主桁の横座屈よりも先に，上フランジの床版破壊箇所の右側ウエブ近傍において内部はく離を起こしたためと考えられる．以上のことから，上フランジである床版が載荷点の右側で内部はく離を起こし，これにより本来フランジが負担するはずであった力が主桁側に伝達され，その結果，桁全体の曲げによる横座屈が発生したものと考えられる． すなわち，床版内部のポリウレタン層のはく離が生じ，そのために主桁上フランジの一部である床版が重ね梁状態になって断面減少が発生し，上フランジと腹板上部が曲げ圧縮によって横座屈したことが推定できるといえる．

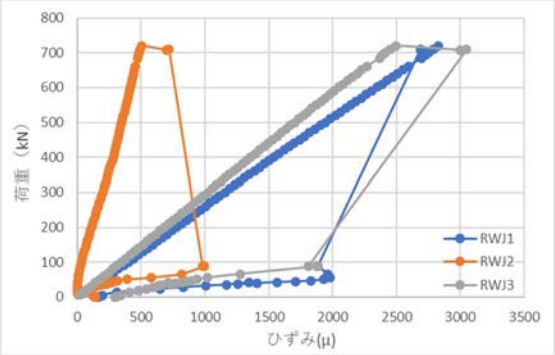


a)右側ウエブ

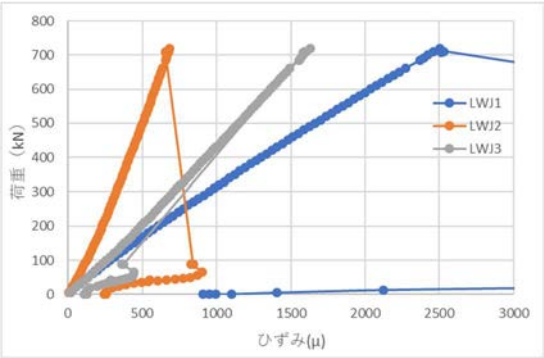


b)左側ウエブ

図−17　破壊部の支点側軸方向ひずみ

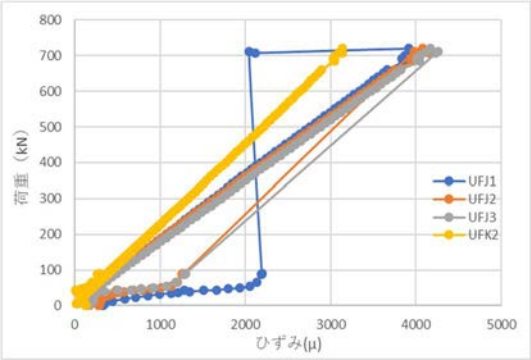


a)右側ウエブ

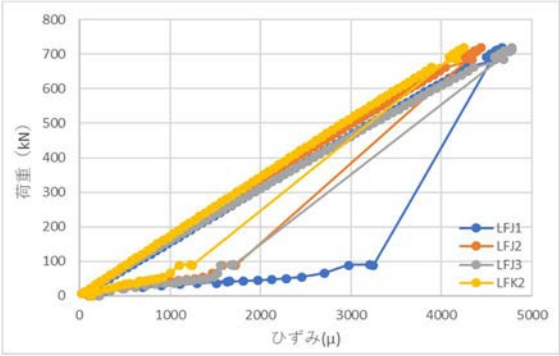


b)左側ウエブ

図−16　破壊部の載荷点側軸方向ひずみ



a)床版



b)下フランジ

図−18　破壊部近傍の床版，下フランジのひずみ

4. せん断載荷実験結果

(1) 破壊状況

せん断載荷実験において，載荷荷重が 520kN へ到達した際に，破裂音とともに荷重が 440kN まで低下したため，試験機を一時ホールドして確認作業を行った．**図−19** に示す通り，右側支承ダイヤフラム部と中央ウエブの桁端部において，支承直上が局部的に支圧力で破壊した．

その後，再度荷重を増加させることができたので，実験を継続したが 630kN にて「ミリミリ」という繊維の千切れるような音がした後に，破裂音とともに荷重が再度 420kN まで低下した．調査の結果，**図−20** に示す通り，ダイヤフラム左下部および左桁端部においても，支承が下フランジへ押し込まれるような変形が生じた．しかしながら，左右ウエブおよび上フランジに破壊は見られなかった． ホールド後も徐々に荷重が低下して行き，393kN まで低下した．

確認作業終了後，載荷を再開したところ再度荷重増加が見られたため実験を続行した．570kN 到達時に支承金物によって局所変形を受けた下フランジより「パリパリ」と割れるような音がしたが，荷重の低下などの影響は見られないため実験を継続した．また 590kN 到達時に破裂音が響いたが，こちらも荷重へ影響が見られないため実験を継続した．その後も支承部周辺から時折破砕音がしていた．

a)支点上ダイヤフラム

b)右側支承下フランジ

図−19 右側支承下フランジ近傍の支圧破壊

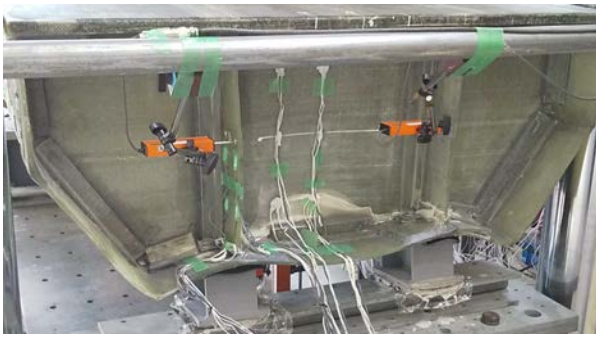
荷重が 910kN に到達した際，いままでのものよりも大きな破裂音と繊維の切れる音が継続して発生し，荷重が低下したので，確認作業を行った．**図-10** に示す通り，ホールド中にダイヤフラムのひび割れが右下から左上に広がって破壊が進行し，中央ウエブに挟まれたエリアのダイヤフラムに割れが伸びていった．ホールド後も荷重は低下し続け，最終的に 770kN まで低下した．

確認作業完了後，除荷を開始して実験を終了させた．

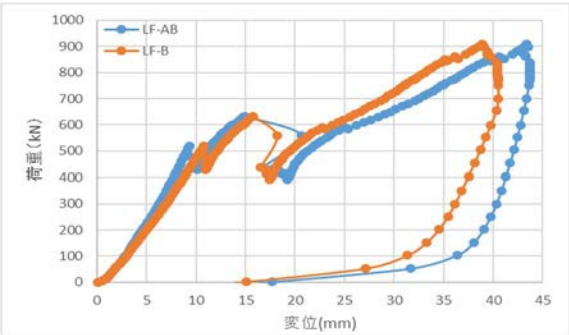
(2) 鉛直変位計測結果

せん断載荷実験における最大荷重は 910kN であり，**図-22** に示す通り，載荷点直下の最大鉛直変位は LF-AB 点で 43.4 ㎜であった．同図から，大きな破壊が 3 回生じたこともわかる．破壊のたびに荷重が減少するとともに鉛

図−20 両側支承が下フランジに押し込まれる支圧破壊



図−21 端支点ダイヤフラム中ウエブ間の破壊



図−22 載荷点直下の鉛直変位

直変位が増加していることがわかる．図-23 には端支点付近の主桁腹板のせん断応力度を 3 軸ひずみゲージの値から求めて示している．同図から，右側主桁腹板(LW)の方がせん断応力度は大きくなっており，破壊も先に進行したことと一致する．また，両主桁腹板とも，破壊が生じてもせん断応力度は荷重に対してほぼ線形的に増加していることから，支点上ダイヤフラムが局所的に破壊しても，主桁の機能が失われておらす支点まで荷重が伝達できていることを示すものと考えられる．また，許容せん断応力度 106N/mm^2 に対して半分以下の応力度であったことがわかる．

(3) ひずみ計測結果

図-24～26 に荷重と支点付近の破壊箇所近傍のひずみの関係を示す．図-24 から，桁端部の下フランジのひずみは 3 回目の破壊で大きくなっていることがわかる．下フランジは支承金物によって局所変形を受けたことが原因であると考えられる．また，図-25 から，1 回目の破壊時に左中主桁ウエブ端部のひずみが増大していることがわかる．この部分は支圧を受けて下フランジ接合部が局所破壊しており，2 回目の破壊までにひずみゲージが計測不能になっていることがわかる．

さらに，図-26 のダイヤフラムのひずみから，1 回目の破壊時のひずみ増加は少ないが，2 回目，3 回目の破壊になるに従って，ひずみが増大していることがわかる．

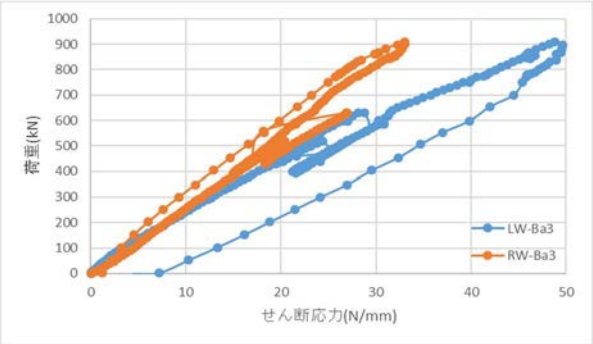
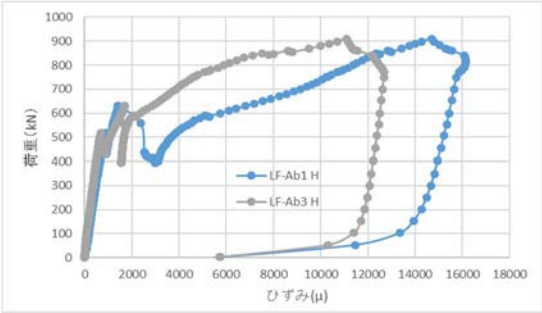
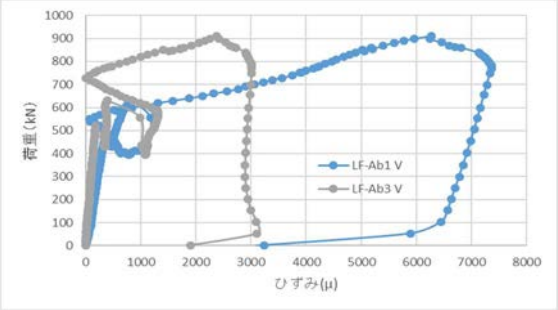


図-23　端支点付近の主桁腹板のせん断応力度

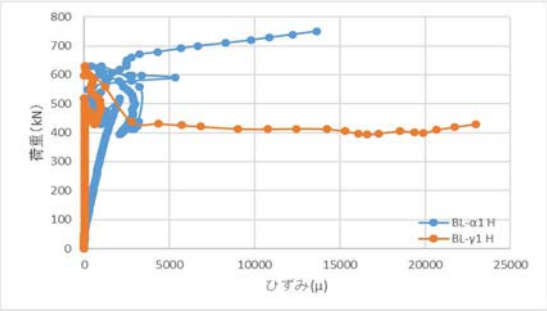


a)軸方向

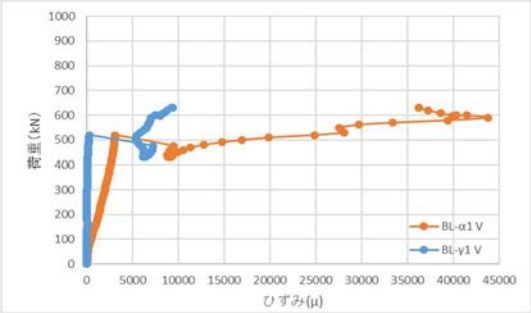


b)軸直角方向

図-24　桁端部下フランジのひずみ



a)軸方向

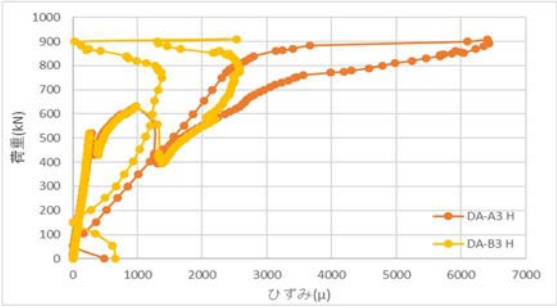


b)軸直角方向

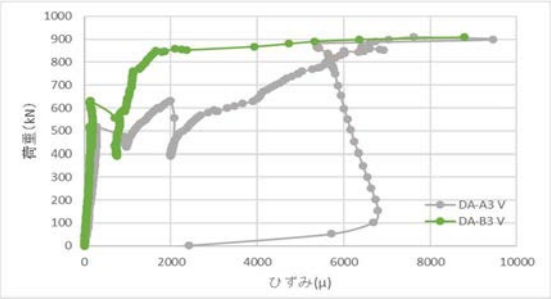
図-25　左中主桁ウエブ端部のひずみ

表-2　せん断載荷実験結果一覧

項目		載荷荷重 kN	支点反力 kN	備考
実橋	設計最大支点反力時計算値	—	107	
	設計許容せん断応力度時計算値	—	1100	
実験供試体	設計最大支点反力時計算値　P_{DA}	34	27	P_{max}／P_{DA}＝15.4
	設計許容せん断応力度時計算値　P_{DB}	346	277	P_{max}／P_{DB}＝1.5
	GFRP 主桁せん断強度限界計算値	1400	1120	
	第 1 回目の破壊荷重(支点部支圧破壊)実験値 P_{max}	520	416	
	第 3 回目の破壊荷重(ダイヤフラムの破壊)実験値	910	728	



a)水平方向



b)鉛直方向

図-24　支点上ダイヤフラムのひずみ

５．まとめ

本実験結果から，以下のことがいえる．

(1)曲げ載荷実験において，床版内部の面内で水平に剥がれるような破壊が生じ，上フランジの一部の断面が欠損したような状況となり，主桁の横座屈による破壊に繋がったと考えられる．

(2)曲げ載荷実験から，設計最大曲げモーメントに相当する計算値は，床版破壊時の曲げモーメントに対して5.9 倍の安全率があり，実橋の安全性は十分であるといえる．

(3)端支点の支承直上の中主桁ウエブの支圧破壊やダイヤフラムの支圧破壊が先行して発生するが，ダイヤフラムが破壊する終局段階まで1.75倍（910kN／520kN）の残存強度があり，支点部の安全性が確認できた．

(4)せん断載荷実験から，設計最大支点反力に相当する計算値は，端支点の支圧による破壊に対して15.4倍の安全率があり，実橋の安全性は十分であるといえる．

謝辞：本研究に際して，当時ものつくり大学建設学科の稲木等君他関係各位にお世話になりました．

参考文献

1) 株式会社コムテック：VACUUM INFUSION GRP BRIDGE, カタログ
2) Łukasz Pyrzowski1, 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，－技術とその展望－，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 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，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) 大垣 賀津雄，小林 朗，小森 篤也，秀熊 佑哉：超軽量 FRP 複合床版の静的載荷実験と現場施工，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

(Received August 28, 2020)

EXPERIMENTAL STUDY ON BENDING AND SHEARING LOAD CAPACITY OF A BOX GIRDER BRIDGE WITH BONDING GFRP MOLDED MATERIAL

Sumitaka INOUE, Mitsuharu MIYATA, Tetsuo IKEDA, Masaru JIFUKU, Yasuko SAOSHIRO, Kazuo OHGAKI and Teru SHIMOMAE

Glass fiber reinforced plastic (GFRP) is drawing attention because it does not corrode in severe corrosive environments such as beaches. Therefore, the number of bridge manufacturing and construction cases using GFRP is increasing. In recent years, the authors have produced a box-girder bridge in which GFRP members molded by the Vacuum Infusion (VI) method are joined with an adhesive.

There are few studies on the load bearing capacity of FRP bridges manufactured by such a method. Therefore, bending and shear loading tests were carried out on FRP bridge specimens manufactured at 1/2 scale of the actual bridge. This paper introduces these experimental studies.