(17) CFRP板補強GFRP桁の拡幅歩道橋への適用に 関する実験的検討

野阪 克義1·久部 修弘2·松村 政秀3

¹正会員 立命館大学准教授 理工学部都市システム工学科(〒525-0058 滋賀県草津市野路東1-1-1) E-mail: k-nozaka@se.ritsumei.ac.jp

²正会員 三菱樹脂インフラテック株式会社 防水補強部(〒103-0021東京都中央区日本橋石町1-2-2) E-mail: hisabe.nobuhiro@mb.mpi.co.jp

³正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail: matsumura.masahide.4s@kyoto-u.ac.jp

近年,FRPの橋梁への適用が検討されているが,設計指針などが確立していないため,FRPを用いて橋梁を設計する際には,事例ごとの検討が必要な状況である.本研究では,比較的安価なGFRPを主材として,CFRPで補強した桁を既存橋梁の拡幅歩道橋へ適用できないかを検討した.引張試験,圧縮試験(矩形断面),圧縮試験(箱形断面),箱形断面の局部載荷試験,およびGFRP単体桁の曲げ試験など,GFRP桁を構成する材料の要素実験を行い材料特性を把握した.次に,要素試験結果を考慮して拡幅歩道橋としての試設計を行い主桁断面を決定し,床版と有効幅を考慮に入れたGFRP積層補強桁を製作し,曲げ載荷試験を実施,曲げ耐力やたわみ性状について検証した.特に,一方向繊維補強材であるGFRP桁やCFRP板を組み合わせた際のせん断変形については,設計時(理論値)と製作された構造物(実測値)とのたわみ量の整合性を検証する必要がある.これらの結果より,GFRP積層補強桁は十分な耐荷能力を有しており,たわみ量もせん断たわみを考慮することにより実験結果を推定できた.したがって,提案したCFRP板補強GFRP桁は拡幅歩道橋に適用できることが示せた.

Key Words: CFRP, GFRP, girder, extended sidewalk, bending strength, trial design

1. はじめに

既存橋梁の多くは鋼材やコンクリートで建設されているが、自然環境からの影響による腐食など、耐久性についての問題が指摘されている。これらの問題を解決するための新たな建設材料として、近年、繊維強化樹脂材(Fiber Reinforced Plastic: FRPと表記)が建設分野で注目されている 1,2 . FRPは繊維に樹脂を浸み込ませ、硬化させて成形した複合材料であり、比強度が高く、自由設計、耐腐食性、他の材料との複合性で優れているとされている。

一方,既存橋梁の中には,交通需要の変化や積雪などによる季節的な問題により歩道部分の追加や歩道部分の拡張が必要となる橋梁もある³.このような場合,橋梁の床版部を拡幅する必要があるが,既存の主桁などの主構造部材に拡幅部分の床版を支持する部材を添架する場合が多い.

このような拡幅歩道橋の部材は、既存橋梁の下部構造

への負担や、メンテナンスの簡便性を考慮すると、軽量で腐食に強い材料が適していると考えられる。現在では、拡幅歩道橋にアルミニウム材やFRPが用いられているケースもある。特にFRPは軽量で施工時にも重機を必要としないため、交通車両がある既設橋における拡幅歩道橋設置への適用性は高いと思われる。

しかしながら、FRP橋梁が建設されている事例はあるものの 2 、鋼材とは異なる材料特性を持つために設計指針などが未整備の状況であり、FRPを橋梁に適用するためには事例ごとの検討が必要である。FRPを構造部材として適用可能か検討する場合、構成する材料の強度を把握し、さらに部材としての挙動・強度を把握、設計に必要なデータを収集する必要がある 4 5 .

著者らは、比較的安価なGFRPを主材とし、高弾性 CFRPで補強した桁を既存橋梁の拡幅歩道橋に適用する ことを目的として検討を行ってきた. 想定している部材 は拡幅歩道橋の床版を支える桁部分であり、図-1に示す ように箱形断面のGFRP材を積層した桁部材である(後

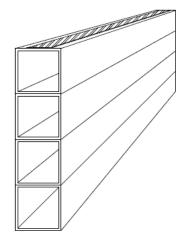


図-1 GFRP 積層桁概略図(上下反転)

述の適用方法と比較して反転している). これまでI形 GFRP断面のフランジのみにCFRPを配置した適用事例のはあるものの、設計上の自由度が低いという欠点があった. ここで提案する箱形断面を積層する方法の特徴は、必要断面性能に応じて自由に桁高・CFRP補強量を組み合わせることができる点である. 規格品である引き抜き成形材を使用することで価格を抑えることにもつながる. また、高弾性CFRP板を中立軸から離れた位置に接着することで必要な曲げ剛性を確保することが可能である.

ここで想定しているGFRP, CFRPは一方向繊維補強材であり、繊維方向と繊維直角方向の材料特性が異なる. そのため、繊維方向を考慮した耐力、たわみ量の算出が必要となる.本研究では、CFRP板補強GFRP桁の拡幅歩道橋への適用可能性について実験的に検討した.まず、GFRP桁を構成する材料の要素試験を行い、材料特性を把握した.これらの実験結果をもとに試設計を行い、床版付きCFRP板補強GFRP桁の断面を決定、曲げ載荷試験を行い、耐力やたわみ量の理論と実測値を比較・検討した.

2. GFRP桁の要素試験

歩道橋への適用を想定しているGFRP桁部材(100mm ×100mm,厚さ5mmの正方形箱形断面)の材料特性を把握するため、桁部材から切り出した試験片を用いて引張試験、圧縮試験(矩形断面、箱形断面)、および局部載荷試験を行った。また、箱形断面桁の曲げ載荷試験を行い、破壊性状について検討した。

試験は全て万能試験機を用い、ひずみ・荷重・変位の 計測を行った. なお、実験に用いたGFRP材は全て長手 方向の1方向繊維補強材である.

要素実験についてはすでに文献かで報告しているため、

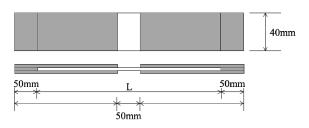


図-2 引張試験供試体概略図

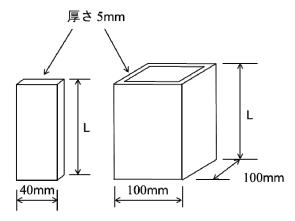


図-3 圧縮試験供試体概略図(左:矩形,右:箱形)

ここでは概略および実験結果のまとめのみを示しておく.

(1) 実験概要

a) 引張試験

引張試験片の概要図を図-2に示す. 引張試験はFRP成形板の両端に治具となる鋼板を接着し、鋼板を引張試験機のグリップで挟み引張荷重を与えた. 供試体は2種類使用し、寸法は繊維方向供試体 (A-1~3) が350×40×5mm、繊維直角方向供試体 (B-1~3) が100×40×5mmであり、各3体の計6体載荷試験を行った. 繊維方向と繊維直角方向で供試体の寸法が異なるのは繊維方向の供試体では強度が高いため、先にグリップ付近ですべりが発生することを防ぐためである.

b) 圧縮試験 (矩形断面)

矩形断面の圧縮試験の概要図を図-3 (左図) に示す. 矩形断面の圧縮試験では、GFRP桁から切り出してきた供試体を加工せず試験を行った. 供試体は繊維方向 (A-1~3) と繊維直角方向 (B-1~3) の2種類使用し、寸法はともに90×40×5mmで、計6体載荷試験を行った.

c) 圧縮試験(箱形断面)

箱形断面の圧縮試験の概要図を図-3 (右図) に示す. 箱形断面の圧縮試験では、想定しているGFRP桁 (100mm×100mm, 厚さ5mmの正方形箱形断面) が矩形断面と比較して圧縮挙動がどのように異なるかを検討した.供試体は高さLが90mm (A-1~3), 180mm (B-1~3), 270mm (C-1~3) の3種類について各3体ずつの計9体試験した.

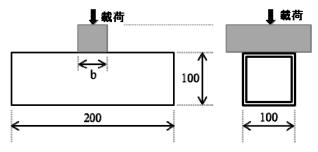


図-4 局部載荷試験供試体概略図

表-1 実験結果まとめ

	A	В	C
a)引張試験	292	39	_
b)圧縮試験(矩形)	252	69	_
c)圧縮試験(箱形)	203	164	179
d)局部載荷試験	45	86	_

表-3 圧縮試験 (矩形) の座屈強度理論値

	A (繊維方向)		B(繊維直角方向)	
境界条件	単純	固定	単純	固定
座屈強度	87.0	347.8	23.1	94.2

d) 箱形供試体の局部載荷試験

局部載荷試験の概要図を図-4に示す. GFRP桁の曲げ 載荷試験を行った場合, 載荷位置および支点部において めり込み破壊(支圧破壊)が起こり, 圧縮強度や引張強 度に至らずに桁が耐力を失う可能性が想定されたため, あらかじめ箱形断面で, どの程度の支圧力でめり込み破 壊が発生するかを実験的に検討した.

供試体は長さ200mmのGFRP桁部材を用い, 載荷範囲を50mm (A-1~3) と100mm (B-1~3) の2種類として各3 体ずつ計6体載荷試験を行った.

e) 箱形供試体の曲げ載荷試験

GFRP桁の曲げ載荷試験では、100mm×100mm、厚さ5mmの正方形箱形断面で長さ1600mmの供試体を3体使用した. 余長を50mmずつとり、スパン1500mm、等曲げ区間を500mmとした(図-5).

ひずみゲージは上面と下面,片側側面の3面に貼付けた. 計測は等曲げ区間内で行い,中央から左右150mmの位置の2列とした. 上面と下面については中央に1枚ずつ,側面は高さ方向に20mm間隔で貼付け,1列に6枚計12箇所のひずみを計測した. たわみについては桁中央の1箇所のたわみを計測した.

(2) 実験結果

a)引張試験からd)局部載荷試験までの実験結果(平均値)をまとめたものを表-1に示す.表-2には、比較のた

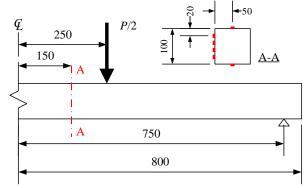


図-5 箱形供試体の曲げ試験概要

表-2 GFRP材料の材料特性(カタログ値)

	繊維方向	繊維直角方向	
比重	1.6~2.0		
引張強さ	250~550	20~40	
引張弾性係数	20,000~30,000	5,000~7,000	
曲げ強さ	250~550	70~130	
曲げ弾性係数	10,000~25,000	7,000~10,000	
圧縮強さ	200~450	70~130	
横剪断強さ	130~200	40~70	
繊維含有率	45~60(%)		

めにGFRP桁の材料特性(カタログ値)を示してある. 表-1,表-2中の数値は特に表記がないものはすべて単位はN/mm²である.

引張・圧縮試験の結果はAが繊維方向,Bが繊維直角方向であり、おおよそカタログ値の範囲内に入っている. 引張・圧縮試験結果から弾性係数も算出したが、平均値でそれぞれ34,000N/mm²,11,000N/mm²となり、カタログ値より大きめの値となった.

圧縮試験では、座屈することも考えられたため、引張・圧縮試験から求められた弾性係数を用いて座屈強度(単位:N/mm²)を算出した(表-3). Aタイプ(繊維方向)およびBタイプ(繊維直角方向)とも、単純支持と仮定した場合の座屈強度はカタログ値を下回っている。実験結果はカタログ値に近い値となっているため、実際の境界条件は固定に近い境界条件だったと考えられる.これは、供試体端部の形状が切り出したままであったことが原因である.

箱形断面の圧縮試験 (c) では、ばらつきが大きく平均値だけを見ると供試体の高さによって異なる結果となった。箱形断面の1辺を両縁単純支持の圧縮板(載荷縁も単純支持)とした時の座屈強度は約311N/mm²となり、前述の圧縮試験の結果とは異なり、実験値が理論値よりも低い値となった。これは、崩壊形状(図-6)が異なることで説明できる。箱形断面が圧縮力を受けた際、供試体高さ中央付近の面外変形が大きくなり、角部分に引張応力が発生、角部分が避けるように崩壊し、耐力が低下したと考えられる。この崩壊形状は文献®によっても指

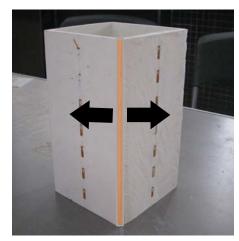


図-6 圧縮試験(箱形)の破壊位置

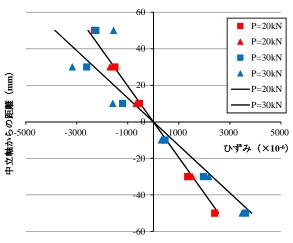


図-8 曲げ試験体断面のひずみ分布

摘されている.

局部載荷試験結果は最大荷重をウェブと接している断面積(Aタイプ:5mm×50mm×2=500mm², Bタイプ:5mm×100mm×2=1,000mm²)で除した値の平均値である. 崩壊形状としては載荷位置に用いていた鋼材がGFRP桁材にめり込む形であった. Aタイプ, Bタイプで比較した場合, 載荷幅が2倍になることにより最大荷重も約2倍となっており, 最大荷重が載荷幅におおよそ比例していることがわかる. これは, 支圧強度が単純に支圧部の材料強度に依存していることを示している.

桁として用いる場合にはこの載荷幅(支圧部分の長さ)を大きくすることは現実的ではなく、桁として用いるためには支圧部での補強も検討する必要がある.

箱形供試体桁の曲げ載荷試験において,載荷点2点合計での最大荷重は平均値で40.8kNであった. 図-7に示すように、崩壊形状は箱形断面の圧縮試験と一致しており、供試体の圧縮側において角部に亀裂が入り、上面と側面との繋がりがなくなった結果耐力が低下した. 箱形試験の圧縮試験で得られた圧縮強度182N/mm²(A, B, Cの平均値)からGFRP単体桁の崩壊荷重を算出した理論値



図-7 箱形断面の曲げ試験供試体の破壊形状

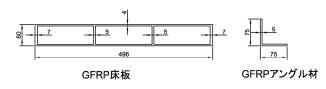


図-9 GFRP床版とアングル材

は41.8kNとなり、実験での最大荷重40.8kNとほぼ同じ値となった.

荷重20kN・30kN時の断面のひずみ分布の一例を図-8に示す. 縦軸が中立軸位置をゼロとした時の位置, 横軸がひずみであり, ひとつの供試体につき2断面計測している. 20kN時では, ほぼ直線的な挙動を示しており, 理論値(黒実線) とも近いことが確認できたため, 断面の挙動としては一般的な平面保持の仮定が適用できることが確認できた. ただし, 30kN時には圧縮側のひずみの値が理論値よりも低下しており, 面外変形が生じている事が分かる.

3. 床版付きCFRP板補強GFRP桁の曲げ載荷試験

ここでは、箱形断面 GFRP 桁を積層し、下面を CFRP 板で補強した桁が拡幅歩道橋に適用できるかどうかを検討するために、曲げ載荷試験を行った. 断面寸法などの決定は次の 4章で示す試設計に基づいているため、詳細についてはそちらを参照して欲しい.

(1) 供試体形状および寸法

GFRP桁を縦方向に4層積層し,下面に幅50mm,厚さ1.2mmの高弾性CFRP板(カタログ値で弾性係数450,000N/mm²,引張強度1,200N/mm²,繊維含有率65~70%)を1枚貼付けた桁を使用した.また,GFRP製の床版(材料特性はGFRP箱形桁)を有する合成桁とした.GFRP箱形断面桁の積層,および床版との接合には二液

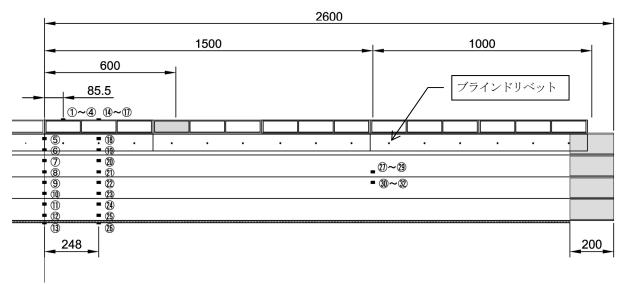


図-10 CFRP補強 GFRP積層桁供試体の概略図(単位:mm)

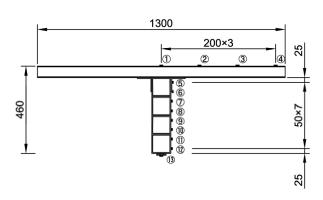


図-11 桁供試体の断面図(単位:mm)

常温硬化形エポキシ系接着剤(引張せん断強さ17.5N/mm²)を用いた. さらに、積層箱形断面桁と床版との連結には、GFRP製のアングル材とブラインドリベット(SS400材でのせん断強度が5.3kN)を併用し、合成作用を高めた. GFRP床版とアングル材の断面寸法を図9に示す. 床版との合成作用を重要視した理由は、2章で示した箱形断面の圧縮試験および曲げ試験における崩壊形状のように、角部での破壊を抑制するためである.

供試体は、桁長5,200mm, 支間長5,000mmとした.供 試体の概略図を図-10に、断面図を図-11に示す.図-10から分かるように、GFRP床版は図-9に示す部材(長さ1,300mm=床版幅)を橋軸方向に複数配置している.アングル材、GFRP床版、GFRP桁は接着接合に加えて、ブラインドリベットを約165mm間隔で配置することによって結合されている.図-12に供試体を下から見上げた写真を示す.

(2) 載荷方法および計測

載荷は, 等曲げ区間を1,200mm, せん断区間1,900mm として4点曲げ載荷とし,油圧ジャッキ(静的最大荷重

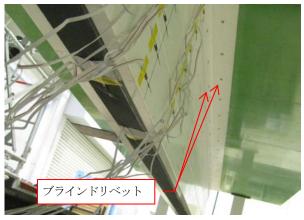


図-12 CFRP補強 GFRP積層桁供試体の下面



図-13 載荷の様子

2,000kN)を用いて載荷した. 載荷点および支点では集中荷重を受け、2章の局部載荷試験結果から補強が必要であるため、無収縮モルタルを充填した. 無収縮モルタルを充填した箇所は図-10で網かけした箇所である. また, 載荷はりの幅が床版の幅よりも狭かったため木材(100mm×100mmの断面,長さ1,300mm)を介して床版に載荷した. 図-13に載荷状況の写真を示す.

計測は、油圧ジャッキから載荷荷重とストロークを、

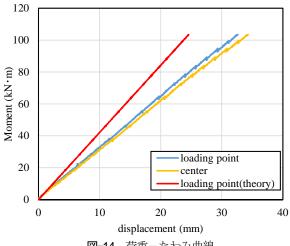


図-14 荷重-たわみ曲線

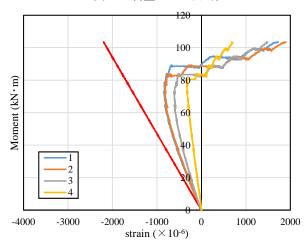


図-16 GFRP 床版のひずみ (載荷点から 85.5mm)

支間中央と載荷点において下面の鉛直方向変位を計測し た. また、ひずみの計測を図-10と図-11の○囲み数字の 位置で行った. 1~26は橋軸方向の1軸ゲージで直ひずみ を, 27~29, および30~32については3軸ゲージでせん 断ひずみを計測した

(3) 実験結果および考察

a) 荷重ーたわみ曲線および崩壊形状

荷重-たわみ曲線を図-14に示す. 青線が載荷点のた わみ、黄線がスパン中央でのたわみである、赤線は荷重 載荷点における曲げ変形のみを考慮した際の理論値であ る. なお、図-11に示す断面(アングル材の断面は無視 する) の断面2次モーメントは約2.87×108mm4で、中立 軸は上縁から207.6mmの位置である(GFRP材 E=34,000N/mm²換算). 最大荷重時(荷重=108kN, 曲げ モーメント=102kN·m) は**図-15**に示すようにGFRP床版 の座屈であり、グラフは最大荷重時まで描いている. 図 -14より、理論値が実験値よりかなり小さい結果となり、 せん断変形によるたわみを考慮する必要があることが分 かった. この点についての考察は後述する.

b) 床版内のひずみ



図-15 崩壊形状

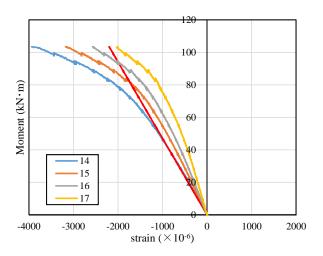


図-17 GFRP床版のひずみ (載荷点から 248mm)

図-16, 図-17にGFRP床版のひずみを示す. 縦軸は等 曲げ区間に作用する曲げモーメント(kN·m)である. 赤線は理論値であるが、せん断遅れのため幅方向にも変 化しており、理論値とも一致しない結果となった. 載荷 点から85.5mmの位置では、幅方向中央においても理論 値となっておらず、床版の構造形式から面外変形が生じ てしまっているものと考えられる.

図-18, 図-19には、スパン中央から85.5mmおよび 248mmでの幅方向のひずみ分布を、幅方向中央でのひず みの値を1.0として示してある. 横軸は幅方向中央から の距離であり、それぞれ $M = 20 \sim 100$ k $N \cdot m$ 時の値である. 248mmでの分布は直線的であり曲げモーメントの増加に 対して分布形状の変化はないが、85.5mm位置での分布 は非線形であり、M=100kN·m時に分布形状が変化して いることが分かる.これは、GFRP床版が3つの箱断面で ひとつの部材となっていることから、この真ん中の断面 にあたる248mm位置の分布形状が比較的安定していたも のと考えられる.

c) 桁断面のひずみ分布

異方性材料である1方向繊維強化材において、鋼材の ように断面の平面保持の仮定が適用できるか、すなわち

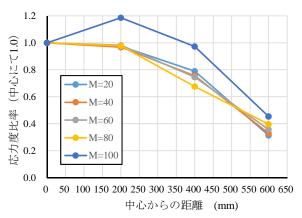


図-18 GFRP床版内のひずみ分布 (85.5mm)

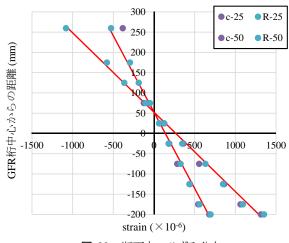


図-20 断面内のひずみ分布

断面内の応力度計算にひずみ分布の線形性が使えるか,を検証するために断面内のひずみ分布を描き、図-20に示す.縦軸はGFRP積層桁の中心(2層目と3層目の間)からの距離(上向きを正)を示し、横軸がひずみである.ひずみ分布の250mm位置付近の値はGFRP床版での価であり、-200mm付近の値は下面に接着されたCFRP板で計測された値である.前述のとおり、GFRP床版でのひずみは荷重に対して非線形性を示したが、その他の箇所では荷重に対して線形的に増加していたため、ここでは曲げモーメントが25および50kN・m時の値のみ示している.凡例における"c"はスパン中央を、"R-"は248mm位置での値である.なお、GFRP床版のひずみ値はスパン中央では計測できていないため85.5mm位置での値を用いている.赤線はそれぞれの曲げモーメント時の理論値である.

この図より、断面内のひずみ分布はGFRP床版部(特にスパン中央部=85.5mm位置)を除いては線形的であり、応力度照査にも平面保持の仮定を用いることができることが確認できた.

d) せん断弾性係数の算出およびせん断たわみの検討

図-10に示したゲージ番号27~29, および30~32は3軸 ゲージであり, せん断ひずみを算出した. 作用せん断力

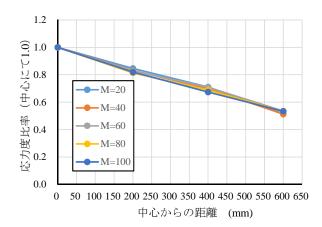


図-19 GFRP 床版内のひずみ分布 (248mm)

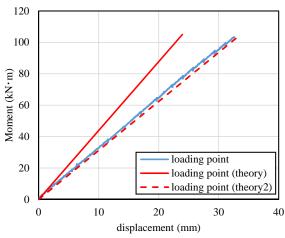


図-21 せん断たわみを考慮したたわみ理論値

がGFRP箱形断面桁のウェブ部分のみで抵抗されるものと仮定し、算出したせん断応力を計測されたせん断ひずみで除して得られたせん断弾性係数はおおよそ3,000~3,500N/mm²の範囲であった. 表-2に示すカタログ値にはせん断弾性係数が含まれていなかったため、せん断たわみを算出する際には、せん断弾性係数を最低値である3,000N/mm²と仮定した.

ここで仮定したせん断弾性係数を用いてせん断たわみを算出し、図-14に示した曲げモーメントによるたわみの理論値に足し合わせて算出した載荷点でのたわみを図-21に示す。図中、比較しやすくするため、図-14に示していたスパン中央のたわみは削除している。図より、実験で得られたたわみをおおよそ再現できており、設計計算にも適用できるものと考えた。

e) 耐荷力の検討

前述のとおり、供試体の最大荷重はGFRP床版の座屈によって決定された。ここでは、GFRP床版が座屈する時の荷重および曲げモーメントを算出する。図-22に示すGFRP床版のひとつのセルの長さは約158mmであり、この部分が圧縮を受ける板構造(載荷辺が単純支持、その他は自由)と仮定すると、座屈応力度は約23.2N/mm²と求められる。ここで、ヤング係数は2章で得られた繊

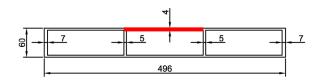


図-22 座屈強度を算出した GFRP 床版の要素

維直角方向の値, 11,000N/mm²を用いた. この座屈応力度が生じる時の作用曲げモーメントを逆算すると,約99kN·mとなり,実験から得られた最大曲げモーメント102kN·mをおおよそ予測できる.

なお、引張側に接着されたCFRP板の破断も想定されるが、高弾性CFRP板の破断強度を1,200N/mm²と想定すると最大曲げモーメントは約103kN·mとなり、わずかの差ではあるがGFRP床版の座屈が耐荷力を決定すると想定されていた。ただし、想定した破断強度はカタログ値であり引張試験の下限値に余裕を持たせている値であることも確認していたため、今回の崩壊形状は想定通りであったと言える.

4. 試設計計算

試設計は、FRP歩道橋設計・施工指針(案)%に(以降本文中では設計指針と称す)基づき行った。安全率や特性値については設計指針の値を参照している。なお、振動や衝撃については今回は検討していない。

(1) 設計条件

a) 歩道橋の設計条件

性能照查手法 FRP歩道橋設計・施工指針(案)⁹

 橋長
 5,200mm

 支間長 L
 5,000mm

 全幅員 B
 3,500mm

固定死荷重主構造,床版,地覆

表-4 試設計に用いた材料特性

材料	使用箇所	強度 (N/mm²)	弹性係数 (N/mm²)
•		292 (引張)	34,000
GFRP	主桁・床版	39.3 (圧縮)	11 000
		23.2 (座屈)	11,000
CFRP	下面補強	1,200(引張)	450,000

付加死荷重 舗装, 防護柵 活荷重 群集荷重 3.5kN/mm² たわみ制限値 12.5mm (L/400) 主桁 箱形GFRP桁 (4層)

下面を高弾性CFRP(幅50mm, 厚さ

1.2mm) で補強

b) 材料特性

使用したGFRPおよびCFRPの材料特性を表4に示す. 強度および弾性係数に関しては2章での引張試験および 圧縮試験で得られた結果を使用した. 補強に用いる CFRP板に関してはカタログ値を用いた. GFRP材は繊維 方向と繊維直角方向で強度が異なるため、2種類の特性 を示すとともに、3章で確認したGFRP床版の座屈強度も 示している. なお、比重はCFRP、GFRPともに18kN/m³ とした.

c) 一般寸法

想定した歩道橋の一般寸法を図-23に示す。2主桁とし、主桁はGFRP箱形断面を4層積層したものであり、下面を高弾性CFRP板で補強している。またGFRP床版と主桁とは、3章で述べた実験供試体と同様、接着接合とリベット接合を併用することにより、合成挙動すると仮定した。橋長は5,200mmであり、支間長は5,000mmである。

(2) 主桁の安全性に対する照査

桁に作用する死荷重および活荷重について、慣用計算

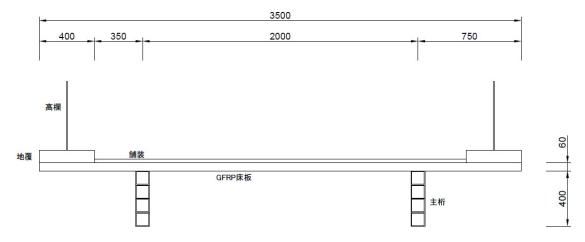


図-23 GFRP床版付き CFRP補強 GFRP桁の断面図

法を用いて主桁1本あたりの荷重を算出する.床版や付加荷重に関しては設計指針9を参考に仮定した.

a) 荷重計算

慣用計算法で算出した影響線を用いて、単位長さあたりの死荷重および活荷重を算出した.

主桁	0.138 kN/m
床版	1.172 kN/m
高欄	0.255 kN/m
地覆	0.113 kN/m
舗装	0.311 kN/m
全死荷重	1.989 kN/m
活荷重	6.619 kN/m

b) 作用断面力

設計指針⁹では、作用の特性値を算出する際に、許容 応力度設計法にて定義されている荷重値に作用修正係数 (1.65) を乗じるとされており、ここでも作用修正係数 を用いた. 固定死荷重に関しては床版および主桁の主構 造と地覆の死荷重を、付加死荷重に関しては高欄と舗装 の死荷重の和として算出した.

照査に用いる作用断面力を算出すると次のようになった. 単純ばりであるため, 支間中央の曲げモーメント, および端支点部のせん断力のみ算出している.

支間中央曲げモーメント: $M(S_d) = 48.0 \, \text{kN} \cdot \text{m}$

端支点部せん断: S(Sd)=38.5 kN

c) 設計断面耐力

材料強度は要素試験で得られた強度を安全率で除した値を使用した. 材料係数は設計指針⁹に基づき1.30を使用した. CFRPの引張強度に関しては, あらかじめ材料係数が考慮されているものとして, ここでは材料係数で除していない.

また、床版に関しては橋軸直角方向の繊維配置であったため、圧縮強度は床版の寸法からオイラーの座屈定理を用いて算出した座屈強度を適用した.

以下に材料強度を示す. なお、GFRP床版とCFRPに関してはGFRP桁の弾性係数に換算して強度を算出している.

GFRP引張強度: fud=292.0/1.30=224.6 N/mm²

GFRP圧縮強度: $f_{cud} = 179.0 / 1.30 = 137.7 \text{ N/mm}^2$

CFRP引張強度: fcg'=1,200×34,000/450,000=90.7 N/mm²

GFRP床版座屈強度: fsmd' = (23.2×34,000 / 11,000) / 1.30 =

55.2 N/mm²

床版の有効幅は、道路橋示方書¹⁰⁾を参考に1,300mmと 算出した.

以上より、GFRP床版を含めた主桁の断面2次モーメントおよび断面係数が以下のように求められた.

断面2次モーメント $I = 2.872 \times 10^8 \, \text{mm}^4$

断面係数(圧縮側床版上縁) $W_{cl} = 1.383 \times 10^6 \, \text{mm}^3$

断面係数(圧縮側主桁上縁) $W_{c2} = 2.043 \times 10^6 \text{ mm}^3$

断面係数(引張側)

 $W_t = 1.135 \times 10^6 \text{ mm}^3$

設計指針⁹にあるとおり部材係数y_b =1.30を用いて設計 断面耐力を算出すると次のようになった.

床版上面(座屈):M_{scrud}=W_{cl}×f_{scrud}^{*}/y_b=58.7 kN·m

主桁上縁(圧縮): Mond=Wc2×fond/yb=216.4 kN·m

CFRP破断: $M_{CFud} = W_t \times f_{CF'} / \gamma_b = 79.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$

以上より、床版上面の座屈耐力が最小となっていることから、曲げモーメントに対する設計断面耐力は、 M_{tot} = 58.7 kN·mとなった.

せん断に対する設計断面耐力は、主桁を構成する GFRP箱形断面桁のウェブのせん断強さ(表-2参照)を 参考に次のように求めた.

 $S_{ud} = 100 \times 5 \times 4 \times 2 \times 130 / 1.30 / 10^3 = 400.0 \text{ kN}$

d) 耐力の照査

作用断面力と設計断面耐力を比較する. なお, 構造物 係数は1.0とした.

M(S_d)/M_{ud}=48.0/58.7=0.82 ≦1.0 ・・・・ 照査OK S(S_d)/S_{ud}=38.5/400.0=0.10 ≦1.0 ・・・・ 照査OK したがって、照査を満足する.

(3) たわみの照査

設計指針⁹では、たわみの照査は使用性に対する照査として行われており、照査事例では活荷重の値として1.0kN/mm²を採用している。しかしながら、道路橋示方書でのたわみ制限を交流する際の荷重条件を考慮し、本試設計では活荷重として3.5kN/mm²を採用することとした。たわみの制限値は支間長の1/400である。たわみは、設計指針⁹を参考に曲げによる変形ôbendingとせん断による変形ôshearの合計値として式(1)を用いて算出した。

$$\delta = \delta_{bending} + \delta_{shear} \tag{1}$$

ここで,

 $\delta_{bending} = k_1 F L^3 / EI$

 $\delta_{\text{shear}} = FL/(4A_wG)$

であり、各変数は、 $k_1=5/384$ (たわみ算定式の係数),F=33.1kN(はりに作用する鉛直荷重の合計),L=5,000mm(支間長), $E=34,000N/mm^2$ (GFRPの弾性係数), $I=2.872\times10^8mm^4$ (断面2次モーメント), $A_w=3,800mm^2$ (ウェブ断面積), $G=3,000N/mm^2$ (せん断弾性係数)である.

なお, せん断弾性係数は第3章で算出した値を用いた. 以上より, 照査結果は以下のとおりとなり, 照査を満足する.

 $\delta = 5.52 + 3.11 = 8.63 \text{ mm} < 12.50 \text{mm} (= 5,000 \text{mm} / 400)$

6. おわりに

本研究では、CFRP板で補強した積層GFRP桁の拡幅歩

道橋への適用性を検証した.まず、GFRP桁を構成する材料の要素実験を行い、材料特性を把握した.要素実験としては、引張試験、圧縮試験(矩形断面)、圧縮試験(箱型断面)、箱型断面の局部載荷試験、および単体のGFRP桁の曲げ載荷試験を行った.要素試験結果に基づき試設計を行い、床版付きの主桁断面寸法を決定した.決定した断面寸法をもとに供試体を製作し、曲げ載荷試験を行い所定の耐力を有しているか検証した.

得られたおもな結論は以下のとおりである.

- 可要素試験結果より、今回使用した寸法においては、GFRP 箱形断面が圧縮軸力を受けると、隅角部での破断が耐力を決定する。そのため、GFRP 箱形断面の圧縮側に床版が連結されている合成断面として設計する方が合理的である。
- 2) 床版付きの GFRP 桁に対する曲げ載荷試験より、 所定の曲げ耐力を有することが確認でき、GFRP 床 版の局部座屈強度によって断面の耐力を規定できることが確認できた。
- 試設計により、断面耐力およびたわみの照査を満 足することが確認できた。

今後は、実橋への適用に向けて CFRP 補強 GFRP 桁を用いた橋梁を試作し、その性能を検証していく予定である。実橋への適用に際しては支間長が異なることも想定されるが、積層している GFRP 箱形断面桁の数を変更することにより対応する。また、今回の実験結果からも分かるように、支点部などの集中荷重を受ける箇所には箱形断面の内部に補強が必要であるため、支承機能も兼ねた端部補強材を検討する。

謝辞:本研究における実験実施に際しては、当時立命館 大学大学院に在籍していた大森政和氏の協力を得た.こ こに記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 土木学会: FRP 橋梁-技術とその展望-, (公社)土木学 会構造工学委員会 FRP 橋梁研究小委員会, 2004.
- 土木学会:FRP 部材の接合および鋼と FRP 接着接合 に関する先端技術,(公社)土木学会 複合構造委員会, FRP と鋼の接合方法に関する調査研究小委員会, 2013.
- 3) 西弘明, 今野久志, 岡田慎哉, 角間恒: FRP 合成構造を用いた床版拡幅技術に関する研究, 2013.
- 4) 水貝脩平,前田研一,柳沼謙一:GFRP 桁の重ね合わせ合成による大断面化と実用性に関する研究,土木学会第66回年次学術講演会,CS2-038,2011.
- J.R. Correia, F.A. Branco, N.M.F. Silva, D. Camotim, and N. Silvestre: First-order, buckling and post-buckling behaviour of GFRP pultruded beams Part 1: Experimental study, Computers and Structures Vol. 89, pp. 2052-2064, 2011.
- 6) 山本育美, 浅本晋吾, 睦好宏史, 鈴川研二: ハイブ リッド FRP を用いた構造部材の開発, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.485-486, 2007.
- 7) 大森政和,松村政秀,久部修弘,野阪克義:歩道橋 への適用を目指した CFRP 補強 GFRP 積層桁の構造 特性に関する基礎実験,第 5 回 FRP 複合構造・橋梁 に関するシンポジウム講演概要集,P81~88,2014.
- 8) 櫻庭浩樹, 松本高志, 林川俊郎:積層構成が異な箱型断面 CFRP 梁の曲げ挙動に関する研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学, Vol.68, No1, P73~87, 2012.
- 9) 土木学会:FRP 歩道橋設計·施工指針(案),(公社)土 木学会構造工学委員会 FRP 橋梁研究小委員会,
- 10) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I 共通編, II 鋼橋編, 2014.

EXPERIMENTAL STUDY ON GFRP GIRDER STRENGTHENED WITH CFRP PLATE FOR APPLICATION TO EXTENDED SIDEWALK

Katsuyoshi NOZAKA, Nobuhiro HISABE and Masahide MATSUMURA

Although application of Fiber Reinforced Plastic (FRP) to bridge construction has been investigated, design guidelines have not been officially authorized. Thus, it is necessary to investigate the applicability of FRP materials as construction members in each case. In this study, a possibility of adopting a GFRP girder reinforced by CFRP to an extended sidewalk for existing bridges has been investigated. In order to investigate the performance and the characteristics of a proposed GFRP girder, four-point bending tests were conducted based on the experimental test results of material tests. Material tests included tensile tests, compression tests for a rectangular and a box section, bearing strength tests of a box section and bending test on a single GFRP box girder. For the bending test, a stuck of four layers of GFRP box section reinforced by a CFRP plate on bottom faces with a GFRP slab was farbricated based on trial design calculations. The strength of the girder with a GFRP box section was able to be estimated based on the results of material tests. Deflection of girder due to live load was estimated using the shear modulus based on the bending test, and it was confirmed that deflection requirement was satidfied. The results indicated a possibility of the proposed girder as an extended sidewalk.