論文 FRP 桁と超高強度繊維補強プレキャストコンクリート床版から成る 合成桁の曲げ性状

遠藤 爵*1·睦好 宏史*2·I.S.K.Wijayawardane*3

要旨:繊維補強ポリマー(FRP)は高引張強度,高耐食性,軽量などの特徴を有し,近年腐食環境や架設の制約条件の厳しい建設現場での適用が期待されている。本研究では,GFRP桁とプレキャスト超高強度繊維補強コンクリートセグメント床版を組み合わせた合成桁の開発を行った。この場合,床版と桁との接合には耐腐食性の観点からFRPボルトを用い、合成桁の曲げ載荷実験および実橋梁の載荷実験を行った。その結果,接合材としてFRPボルトを用いた合成桁は金属ボルトを用いた場合と同等な曲げ性状を示すことが明らかとなり,耐腐食性の観点からFRPボルトを用いるのが望ましいことが明らかとなった。

キーワード: GFRP(ガラス繊維補強ポリマー), UFC(超高強度繊維補強コンクリート), 合成桁

1. はじめに

繊維補強ポリマー(FRP)は高強度, 軽量, 高耐食性とい った特徴を有する複合材料であり, 近年橋梁などの構造 物への適用が進められている。FRP 部材の特性である軽 量性は,鉄筋コンクリート構造物と比較し,下部構造に 作用する上部構造反力の低減や,運搬重量の軽減と架設 機材・設備の簡便化,工期短縮をもたらし,従来の材料 を用いた橋梁と比較しても経済性の向上が期待できる。 FRP 部材のもう1つの特徴である耐食性は,維持管理に 必要なコストを大きく低減できる。特に,塩害に強く, 沿岸地域などの厳しい環境下でも腐食が生じないことか ら,構造物の高寿命化に寄与することも期待されている。

一方,ガラス繊維補強ポリマー(GFRP)桁の4点曲げ載 荷実験の結果から、圧縮フランジ部での界面剥離による 圧縮破壊が生じることが明らかにされている¹⁾。また GFRP は鋼材と比較し、剛性が低いため、橋梁に用いた 場合、たわみ制限を満足することが難しいことが指摘さ れている。これらのことから,高い引張強度を有する FRP と高圧縮強度、高剛性を有する超高強度繊維補強コンク リート(UFC)床版との合成桁が開発された。UFC は設 計基準強度 150MPa という高い圧縮強度を有するととも に, 高強度の鋼繊維により高い引張強度, 変形性能を有 する材料である。このため鉄筋を必要とせず薄肉軽量化 が可能となり、合成桁とした場合においても普通強度コ ンクリートを用いる場合に比べて軽量化が確保できる。 既往の研究では合成桁の曲げ載荷実験が行われ、圧縮ひ ずみの低減,剛性の向上が確認されている²⁾。この場合, UFC と GFRP 桁との接合にはステンレス製の高耐食ボル トが用いられた。しかし、既往の研究では、GFRP 桁の 接合部に高耐食ステンレスボルトを用いた海岸における

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム工学系専攻 (学生会員) *2 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員) *3 埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム工学系専攻

暴露実験より,高耐食ステンレスボルトにおいても腐食 が生じることが確認された。従って,ボルトの腐食によ り GFRP 桁の有する耐腐食性を十分に生かすことができ ないことが考えられる。そこで本研究では接合ボルトに 耐食性を有する FRP ボルトを用いた合成桁を開発し,曲 げ載荷実験,暴露実験を行い,その力学的性状及び耐久 性を明らかにした。

実験に用いた材料

2.1 GFRP

本研究に用いた GFRP 桁の積層構成を表-1 に示す。 また引張試験による GFRP 桁の材料特性値を表-2 に示 す。GFRP 桁はすべて GFRP で構成されており,引抜成 形で作製された。

繊維の配向度	フランジ(%)	ウェブ (%)	
GFRP 0°/90°	17	43	
GFRP ±45°	—	43	
GFRP ±45°/0°	74	-	
CSM	9	14	

表一1 GFRP 桁の積層構成

注)角度は軸方向に対する繊維の配向を示す
 CSM(Continuous Strand Mat):表面の保護と引抜
 成形時において正確な形を確保するためのもの

表-2 引張試験による GFRP 桁の材料特性値

部位	ヤング率 (N/mm ²)	引張応力 (N/mm ²)	破壊ひずみ (μ)
ウェブ	15300	194	16100
フランジ	20200	449	21900

2.2 UFC およびモルタル

本研究に用いた UFC の示方配合を表-3 に示す。UFC のプレミックス結合材はセメント,ポゾラン材,エトリ ンガイト生成系材料から成り,長さ 22mm と 15mm の鋼 繊維を体積比で 1.75% として混合した³⁾。打設後 24 時間 で脱型し,85℃の蒸気養生を 24 時間行った。UFC は圧 縮強度 186.2N/mm²,引張強度 11.9 N/mm²,ヤング係数 49.9 kN/mm²であった。また UFC セグメント間の隙間に 充填したモルタルは圧縮強度 90.3 N/mm²,ヤング係数 31.0N/mm²である。

2.3 FRP ボルト

UFC と GFRP 桁の接合に用いた FRP ボルトは 10mm(φ10:山径10mm,谷径7.5mm,ピッチ1.5mm,有 効断面積55.56 mm²)と16mm(φ16:山径16mm,谷径13mm, ピッチ2mm,有効断面積165.10 mm²)の2種類で,せん 断強度試験結果より,ボルトの平均せん断強度は146.0 N/mm²であった。FRP ボルトおよびナットの写真と形状 寸法を図-1に示す。

3. 曲げ載荷実験

3.1 実験要因

表-4 に実験要因を示す。供試体は 6 体で, ボルト間 隔(100mm, 150mm), セグメントの目地間隔(5mm, 10mm), FRP ボルト径(16mm, 10mm)を変化させた。また UFC セ グメント内に埋め込まれている FRP ナットの有無につ いても実験要因とした。比較の為に, GFRP 桁のみの供 試体を作製した。

本実験では、UFC セグメントを製作する場合、あらか じめボルトを型枠底面にナットで固定し UFC を打設し 作製した。UFC セグメント長は 300mm で、1 つの合成 桁に 12 個使用した。図-2 に合成桁の形状寸法、図-3 に断面図を示す。ボルト径 16mm および 10mm の供試体 にはそれぞれ 19mm、12mm の孔を GFRP 桁の上フラン ジにあけた後に UFC セグメントと接合した。桁フランジ 上面と UFC セグメントの接合にはエポキシ樹脂による 接着接合を併用した。使用したエポキシ樹脂に製造メー カーのカタログ値から、圧縮強度 76N/mm²、引張強度 32N/mm²である。この場合 GFRP 桁の表面をサンドペー パーで荒く研磨した後、接着剤を塗布して GFRP 桁と

表-3 UFC の示方配合

空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊
	水	プレミックス 結合材	骨材	混和 剤	維 (kg)
2.0	205	1287	898	32.2	137.4



図-1 FRP ボルトおよびナットの形状寸法

衣一4 夫职安囚					
	ボルト	セグメント	FRP	UFC 内	
供試体名	間隔	目地間隔	ボルト径	ナット	
	(mm)	(mm)	(mm)	有無	
G10-F16-B4	150	10	16	兼	
G10-F10-BN6	100	10	10	有	
G10-F16-BN4	150	10	16	有	
G5-F16-BN4	150	5	16	有	
G10-F16-BN6	100	10	16	有	
GFRP 桁のみ	—	_	_	-	
注) G10-F10-BN4 」 しUFC セグメントのボルトの数					
→UFC セグメントのナットの有無					

→UFC セグメントの目地間隔

UFC セグメントを接合し, 接着剤が硬化する前にトルク 20Nm をボルトに導入した。UFC セグメントの目地間隔 が 5mm および 10mm の隙間にはモルタルを充填させる ことで一体化させた。

ウェブの座屈防止を目的として,幅 60mm,奥行 30mm, 長さ 220mm,厚さ 4mm の箱型の FRP 製のスティフナを 500mm 間隔でエポキシ樹脂により接着した。

3.2 実験方法

実験方法は図-2 に示すように油圧ジャッキを用いた 4 点曲げ載荷であり、破壊に至るまで静的単調載荷を行った。計測箇所は荷重,スパン中央部の変位および UFC セグメント,GFRP 桁上下フランジ,ウェブのひずみで ある。



3.3 実験結果および考察

図-4に曲げ載荷実験の結果から得られた荷重-スパン 中央変位関係を示す。また破壊性状を図-5 に示す。破 壊性状はすべての供試体で曲げスパン内での UFC の圧 縮破壊となった。

セグメントの目地間隔を変えた場合について曲げ性 状の比較をする。G10-F16-BN4 の終局荷重は 155kN, G5-F16-BN4 では終局荷重は 164kN であった。しかし, 曲げ剛性については同様であり,終局耐力についても目 地間隔を 5mm から 10mm に変化させることで耐力が約 5%低下している程度である。従って,目地の間にモルタ ルを現場打設する作業性の観点から目地間隔は 10mm と するのが好ましいと考えられる。

ボルト間隔において、合成桁の挙動を比較する。 G10-F16-BN4の破壊荷重は155kN、G10-F16-BN6の破壊 荷重は194kNであった。両供試体は破壊に至るまでの挙 動を比較すると、曲げ剛性に関してはボルト間隔が 100mmの方がわずかに低く、終局耐力に関してはボルト 間隔150mmの方が低いことがわかる。ボルト間隔100mm に剛性の低下がみられたのは、ボルト間隔150mmに比 ベUFC セグメント1個あたりに使用されるFRPボルト の占める体積が大きいことによると考えられる。すなわ ち FRP ボルトは UFC よりも剛性が低いため、FRP ボル トの量が多い場合、UFC セグメントの剛性が低下するた めであると考えられる。

また終局耐力に関して、ボルト間隔が 100mm の方が ボルト間隔が 150mm の供試体よりも大きかった理由は、 ボルト間隔が 100mm の供試体では UFC セグメント 1 個 あたりに含まれるボルト本数が多くなるため、UFC と GFRP 桁が終局に至るまで完全に一体となって挙動した ことによると考えられる。(図-6)

ボルト径による曲げ性状と終局耐力の比較をする。 G10-F10-BN6の終局荷重は196kN,G10-F16-BN6の終局 荷重は194kNで,両供試体は終局に至るまでの挙動及び 終局耐力は同程度であった。このことから本実験の範囲 内で FRP ボルト径の寸法が終局耐力に与える影響は小 さいと考えられる。終局近傍における曲げ剛性に関して は φ16のボルトを用いた供試体の方が低い結果となっ た。図-1より FRPのナットの大きさを比較すると,幅, 高さは大きく異なっており,UFCに含まれる FRPの体積 量の増加が曲げ剛性低下の原因であると言える。

FRPのナットの有無による曲げ性状と終局耐力を比較 する。G10-F16-BN4の破壊荷重は155kN,G10-F16-B4 の破壊荷重は200kNであった。両供試体の終局に至るま での挙動を比較すると、終局耐力、曲げ剛性ともに G10-F16-B4の方が大きいことがわかる。これはUFC内 にナットが設置されることにより、UFCとナット界面が



図-4 荷重-変位関係



図-5 合成桁における UFC 圧縮破壊 (G10-F16-B4)



図-6 荷重 140kN 時の荷重-スパン中央のひずみ分布 (G10-F16-BN4 と G10-F16-BN6 の比較)

欠陥となり,破壊が進行したものと考えられる。さらに ナットが UFC 内に設置されない方(ボルトのみ)が,UFC との付着が良くなり,ボルトが UFC から外れることを抑 制したと考えられる。



図-7 上下フランジにおけるひずみ関係

本実験で終局耐力および曲げ剛性が最も向上した G10-F16-B4とGFRP桁のみの上下フランジにおけるひず み関係を図-7に示す。図-7より合成桁とすることで上 フランジに作用する圧縮応力を低減させ、下フランジに おける GFRP の高い引張強度を有効に活用することが可 能であると言える。

ボルトの種類による荷重-変位関係を比較する。図-8は、接合部材としてステンレス製ボルトを用いた供試 体 G10-S16-BN4²⁾と G10-F16-B4 の荷重-変位関係を示す。 たわみ制限値 (3200/400=8.0mm, 参考文献⁴⁾より) 内で, ずれ止めに FRP ボルトを用いた供試体はステンレス製 ボルトを用いた供試体と同等の曲げ性状を示している。 このことから FRP ボルトはステンレスボルトを用いた 場合と同等の力学性能が期待できる事が明らかとなった。 従って,ボルトの腐食を考えた場合,接合部には FRP ボ ルトを用いるのが好ましいと考えられる。

4. Fiber Model による解析

Fiber Model による解析を行い、その中から G10-F16-B4 について述べることにする。Fiber Model で は、終局に至るまでUFC床版とGFRP桁にずれは生じず、 平面保持が成り立つと仮定した。図-9 に示す UFC の圧 縮応力-ひずみ関係は、超高強度繊維補強コンクリート の設計・施工指針(案)³⁾(以下,UFC 指針)に記載さ れているモデルを使用した。また、表-5 に円柱供試体 を用いた UFC の圧縮強度試験結果を示す。UFC の中に 設置したボルトの影響はここでは無視することにした。 GFRP の下フランジ応力-ひずみ関係は、非線形である ため、引張強度 1/3 までのヤング係数と 1/3 以降のヤン グ係数をそれぞれ引張試験結果より得たものを用いた。 図-10に実験結果と解析結果を示す。終局耐力および曲 げ剛性ともに概ね精度良く推測可能と言える。なお、他 の供試体についてもほぼ同様の結果が得られた。







表-5 UFC 材料特性值

ſ	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)
	186.2	11.9	49.9





5. GFRP 合成桁の実橋載荷実験

5.1 概要

本章では UFC-GFRP 合成桁の実橋載荷実験について 述べる。本橋は宮城県牡鹿郡女川町出島寺間に架設され ている。使用用途は漁港と出島との連絡歩道橋である。 そのため、材料には塩害を考慮し、桁のみでなく図-1 と同様に接合に FRP ボルトを用いた。載荷実験における 荷重は人の体重を利用し、中央集中載荷を行い、 UFC-GFRP 合成桁の実構造物への適用の検討を行った。

5.2 橋梁諸元

本実験で用いた橋梁は歩道橋として橋長 6.00m, 支間 長 5.69m,総幅員 0.960m,有効幅員 0.750mの単純合成 2 主 I-FRP 桁橋である。2本の主桁には I 型の GFRP 桁が 用いられている。床板にはプレキャスト UFC 床版を用い, GFRP 桁と床版との接合には φ 16FRP ボルトを使用した。 その他の欄干やグレーチング部分に関しても GFRP が使 用されている。なお,GFRP 桁の GFRP 積層構成,UFC の標準配合および材料特性値,φ16FRP ボルト性能につ いては 2. で述べたものと同様である。設計荷重に関して は立体横断施設技術基準 ⁴⁾を参考に活荷重を主桁 3.5 kN/m²,床板 5.0 kN/m²としている。たわみ制限に関して は漁港・漁場の施設の設計の手引き ⁵⁾より主桁 1/500 と している。GFRP 合成桁橋梁側面図を図-11,断面図を 図-12,架設した実橋を図-13 に示す。

5.3 実験結果

図-14に中央集中載荷時の荷重-変位関係を示す。主 桁1, 主桁2の両桁はほぼ同等の値を示しており,中央 に荷重を集中した場合,2本の主桁に均等に荷重が加わ っていることがわかる。たわみの制限値は1/500(1:支間 長)であるため,許容たわみ量は12mmである。8.02kN の荷重を載荷した時の変位は3.14mmとなった。これに より設計荷重18.83kNを載荷した時の変位は計算結果 から8.70mmと推測され,上記のたわみの制限値は満た されている。これらのことから,GFRP合成桁橋梁は歩 道橋として性能を満足していることが分かる。図中の計 算結果はFiber Modelを用いて解析を行った結果である。



図-13 GFRP-UFC 合成桁歩道橋の架設



図-14 実橋梁 荷重-変位関係 (中央集中載荷)

この場合,計算に用いた桁の断面形状は,図-3 に示す ものである。また UFC と GFRP 桁の界面は完全に接着し ているものと仮定した。同一変位において両者を比較し てみると,実験結果は計算結果より耐力及び剛性が幾分 大きくなっていることが分かる。これは欄干,グレーチ ングが桁の曲げ性状に影響を及ぼしたため,橋梁全体の 剛性が増加したためであると考えられる。

6. まとめ

FRP 歩道橋の剛性と耐食性の向上を目的として, GFRP 桁と UFC セグメントを用いて,その接合材に FRP ボル トを用いた合成桁を開発し,載荷実験を行うとともに, 実歩道橋を架設した。本研究から以下のことが明らかと なった。

(1) 曲げ載荷実験より, ずれ止めに FRP ボルトを用いた UFC-GFRP 合成桁の性状は, ステンレスボルトを用いたものと同様であることが明らかとなった。

(2) ずれ止めに FRP ボルトを用いる際は UFC 内にナ ットを埋め込むことによって合成桁の終局耐力および曲 げ剛性が幾分低下することが明らかとなったため、ナッ トを埋め込まない構造とするのがよい。

(3) 実橋載荷実験より, FRP ボルトを用いることにより UFC 床版と GFRP 桁が完全に接合され, 合成桁として機 能することが明らかとなった。以上のことから, FRP ボ ルトは対腐食性ずれ止めとして極めて有用であることが 明らかとなった。

謝辞

本研究は経済産業省の「戦略的基礎技術高度化支援事 業」の一環として行われたものであり、関係者各位に多 大なご支援を頂きました。また、UFCの製作にあたりジ オスター(株)の協力を、FRP材料の製作と提供にあた り福井ファイバーテック(株)の協力を頂きました。こ こに記して謝意を表します。

参考文献

- Nguyen Duc Hai, Hiroshi Mutsuyoshi, Shingo Asamoto, Takahiro Matsui: Structural Behavior of Hybrid FRP Composite I-beam, Construction and Building Materials, Vol.24, Issue 6, pp.956-969, June. 2010
- 2) 新井朋也,睦好宏史,金子浩之,金谷祐良:FRPと超高強度繊維補強コンクリートから成る合成桁の曲げ性状,コンクリート工学年次論文集,34巻2号
- 3) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案),コンクリート委員会 超高強度繊維補強コ ンクリート研究小委員会,2004,9
- 4) 日本道路協会:立体横断施設技術基準·同解説, 1979
- 全国漁港漁場協会:漁港・漁場の施設の設計の手引
 き,2003