

論文 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

新井 朋也^{*1}・睦好 宏史^{*2}・金子 浩之^{*3}・金谷 祐良^{*3}

要旨:CFRP と GFRP から構成されるハイブリッド FRP 桁および GFRP のみから構成される GFRP 桁は軽量、高強度、高耐食性といった特徴を有し、腐食環境や架設の制約条件の厳しい建設現場などへの適用が期待されている。本研究では、ハイブリッド FRP 桁もしくは 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版を組み合わせた合成桁の開発を行うために、材料引張試験および開発した合成桁の曲げ載荷実験を行った。合成桁では、各 FRP 桁単体に比べ、曲げ剛性と耐力が増加すること、圧縮フランジにおける繊維の剥離を防止出来ること、引張フランジにおける高引張強度を有効活用できることが明らかとなった。

キーワード:ハイブリッド FRP, GFRP, 超高強度繊維補強コンクリート, 合成桁

1. はじめに

FRP (Fiber Reinforced Polymer) は高強度、軽量、高耐食性などの特徴を有し、近年橋梁などの構造物への適用が進められている。本研究では CFRP (炭素繊維強化ポリマー) と GFRP (ガラス繊維強化ポリマー) から構成されるハイブリッド FRP 桁 (以下、HFRP 桁) と、GFRP のみから構成される GFRP 桁を使用した。HFRP は、軽量、高強度、高耐久性などの FRP 本来の特徴に加え、強度や価格の異なる CFRP と GFRP を適切に組み合わせることにより、構造部材に要求される力学的性能と経済性を兼ね備える事ができるなどの大きなメリットがある。HFRP を構造部材へ適用することで、工期短縮や維持・管理費の削減が可能となり、特に厳しい腐食環境下や急速施工が必要とされる構造物への適用が期待されるほか、環境負荷低減にも貢献できる。GFRP はその引張強度と剛性は HFRP に劣る。しかし、高価である炭素繊維を使用しないため、コストを抑えることが可能であり FRP 材料の実構造物への適用性は高いと言える。

既往の研究から、FRP 材料を橋梁に適用した場合、鋼、コンクリートに比べ、FRP の剛性が低いことからたわみ制限によって断面が決定され、FRP の高い強度が十分に活用できていないことが報告されている¹⁾。また、I 型 HFRP 桁による曲げ試験結果からも、圧縮フランジにて層間剥離が生じて破壊に至るため、下フランジにおいて発揮されるべき高引張強度を有効活用できていないことが明らかにされている²⁾。本研究は、FRP を実構造物へ適用するために、1) 桁の剛性を高め、2) 圧縮部における FRP の剥離破壊を防ぎ、FRP の高引張強度を可能な限り活用することを満足するために、超高強度繊維補強コンクリート (以下、UFC) と FRP 桁を組み合わせた合成桁を開発するものである。UFC は設計基準強度

180MPa 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性が確保できる。本研究では I 型 HFRP 桁または I 型 GFRP 桁と UFC 床版からなる合成桁の開発を行うにあたり、各 FRP 材料の引張強度試験および FRP 桁と UFC 床版から成る合成桁の 4 点曲げ載荷実験を行い、その力学的性状などを明らかにした。

2. FRP 材料の引張強度試験概要

2.1 使用材料

(1) HFRP

本実験に用いた I 型 HFRP 桁の積層構成を表-1 に示す。HFRP 桁は引抜き成形で製作され、桁剛性を高めるため、大きな応力が作用するフランジは CFRP と GFRP、比較的作用応力の小さいウェブは経済性を考慮し GFRP のみで構成されている。HFRP 桁断面は高さ 250mm、幅 95mm、フランジ厚 14mm、ウェブ厚 9mm である (図-1 (1))。

(2) GFRP

I 型 GFRP 桁の積層構成を表-1 に示す。GFRP 桁はすべて GFRP で構成されており、引き抜き成形で作製された。また、GFRP 桁断面は HFRP 桁と同様の寸法である (図-1 (2))。

2.2 実験要因

引張強度試験に用いた FRP 試験体の諸元を表-2 に、供試体の形状寸法を図-2 に示す。図に示すように FRP 試験体をスチールパイプに挿入し、エポキシ樹脂で硬化させた後、スチールパイプ部を引張ることによって試験を行った。破壊箇所はすべて FRP 試験体部であった。

*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 (正会員)

*2 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

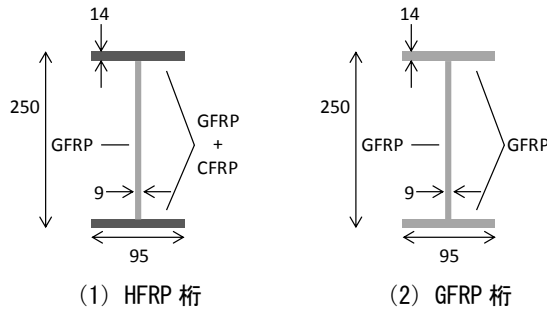
*3 埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム工学系専攻

表－1 HFRP 積層構成

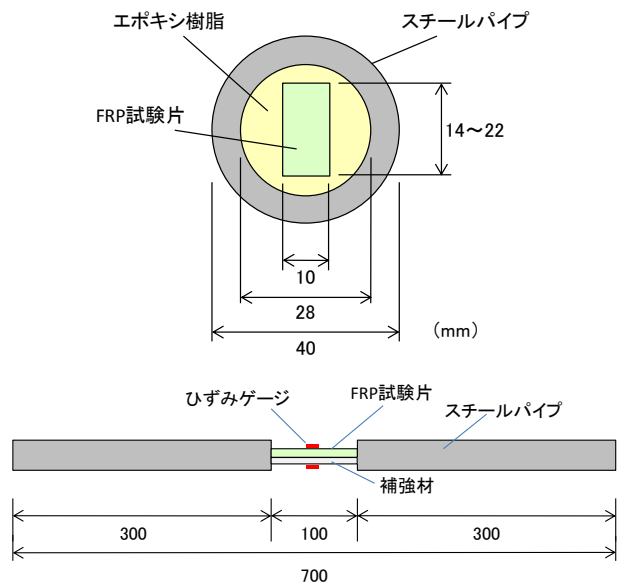
	HFRP 桁 フランジ (%)	GFRP 桁 フランジ (%)	共通 ウェブ (%)
CFRP 0°	33	—	—
GFRP 0°/90°	17	17	43
GFRP ±45°	41	—	43
GFRP ±45°/0°	—	74	—
CSM	9	9	14

注 1) 角度は軸方向に対する繊維の配向を示す

注 2) CSM とはランダムに繊維が配向された積層を示す



図－1 FRP 桁寸法



図－2 引張強度試験体寸法

表－2 引張強度試験諸元

試験体名	使用桁種	幅 (mm)	高さ (mm)	断面積 (mm ²)	長さ (mm)	補強材
HFRP	HFRP	10	14	140	700	なし
GFRP	GFRP	10	14	140	700	なし
GG	GFRP	10	22	220	700	ガラス繊維プレート (8mm)
GC1	GFRP	10	15.2	152	700	炭素繊維プレート 1 枚 (1.2mm)
GC3	GFRP	10	17.6	176	700	炭素繊維プレート 3 枚 (3.6mm)

FRP 試験片は HFRP 桁もしくは GFRP 桁のフランジ部（長さ方向）から切り出したものであり、試験片高さは 14mm、幅は 10mm、長さは 700mm とした。また、表－2 中の試験体 GG 及び GC1、GC3 については GFRP 桁のフランジ部（長さ方向）から切り出した試験片にそれぞれ一方向繊維を有するガラス繊維プレート (8mm)、炭素繊維プレートを 1 枚 (1.2mm)、炭素繊維プレートを 3 枚 (3.6mm) をエポキシ樹脂により接合し、補強したものである。これらは後に記す合成桁の曲げ載荷試験において、GFRP 桁の下フランジ部に GFRP もしくは CFRP のプレートを貼り付けて補強した合成供試体を用いたので、その材料特性を把握するために行ったものである。使用した補強材の特性値を表－3 に示す。

2.3 FRP 材料の引張強度試験結果および考察

FRP 材料の引張強度試験結果を表－4 に、応力－ひずみ関係を図－3 に示す。まず、HFRP と GFRP に着目すると HFRP の引張強度が 880N/mm²であるのに対して、GFRP の引張強度は 449 N/mm²を示した。また、剛性についても HFRP の方が高く、GFRP の 2.5 倍程度であった。次に GFRP 試験片をガラスあるいは炭素繊維プレートによって補強された GG、GC1、GC3 を比較する。

表－3 補強材特性値

補強材名	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
ガラス繊維プレート	500	25
炭素繊維プレート	2400	156

表－4 引張強度試験結果

試験体名	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	終局ひずみ (μ)
HFRP	880	49.4	17800
GFRP	449	20.2	21900
GG	452	23.8	20200
GC1	552	35.0	16800
GC3	576	41.2	10900

GFRP をガラス繊維プレートによって補強した場合の試験体 GG については、GFRP 単体の場合と比較して剛性が 18%程増加したが、強度には変化が見られなかった。次に GFRP を炭素繊維プレートによって補強した場合の GC1 および GC3 を比較する。GC1 の場合には剛性が著しく増加し、強度も 20%程度増加していることがわかった。しかし、GC3 では炭素繊維プレートを GC1 の 3 倍使用したにも関わらず剛性の増加は GC1 に比べて小さく、強度は GC1 と同程度であった。

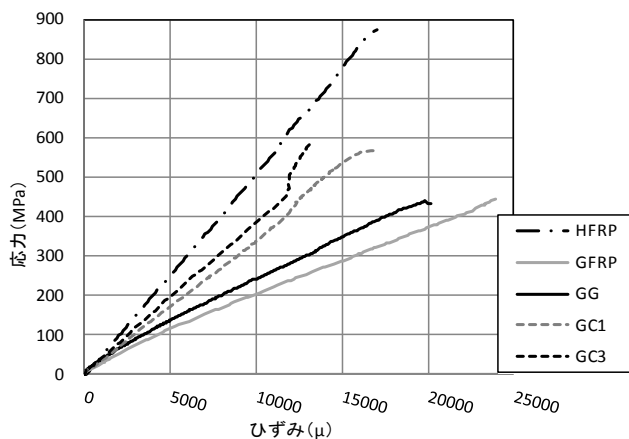


図-3 応力-ひずみ関係

破壊状況を図-4 に示す。HFRP と GFRP の場合には繊維が音を立てて破断するとともに荷重が低下し、破壊に至った。試験体 GG の場合には GFRP 試験片本体より先に補強材であるガラス繊維プレートから破断に至った。これは補強プレートの剛性が GFRP 本体よりも大きいことが影響したものと考えられる。また、試験体 GC1 の場合でも炭素繊維プレートが先に破断していたが、GC3 の場合には GFRP 本体と炭素繊維プレートが破断する前に、両者の接着面で界面剥離を生じていた。これは、GFRP 本体の剛性に対して炭素繊維プレートの剛性が著しく高いために、GFRP と炭素繊維プレートに大きなひずみ差が生じていたことが考えられる。これについて、図-5、図-6 に GFRP ひずみと補強材でのひずみをそれぞれ示す。試験体 GC1 では補強材が GFRP 本体と概ね同様な挙動を示しているが、試験体 GC3 では2つのひずみ増加に差が生じていることがわかる。

以上のことから、本研究においては GFRP 単体では剛性及び強度は HFRP に比べ 1/2 程度であることが判明した。また、材料特性の面では GFRP 材料に同種のガラス繊維プレートを用いて補強する効果は小さい。GFRP に炭素繊維プレートを用いて補強することにより強度および剛性の大幅な向上が期待できる一方、剛性の高い炭素繊維材料を過度に使用することにより接着面での剥離が発生するため注意が必要であることが分かった。

3. HFRP と UFC からなる合成桁曲げ载荷実験

3.1 使用材料

使用した HFRP 桁、GFRP 桁に用いた材料は引張強度実験で使用したものと同様である。本実験に用いた UFC の示方配合を表-5 に、UFC の材料特性を表-6 に示す。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 1.75% 混合した。打設後 24 時間で脱型し、85℃ の蒸気養生を 24 時間行った。

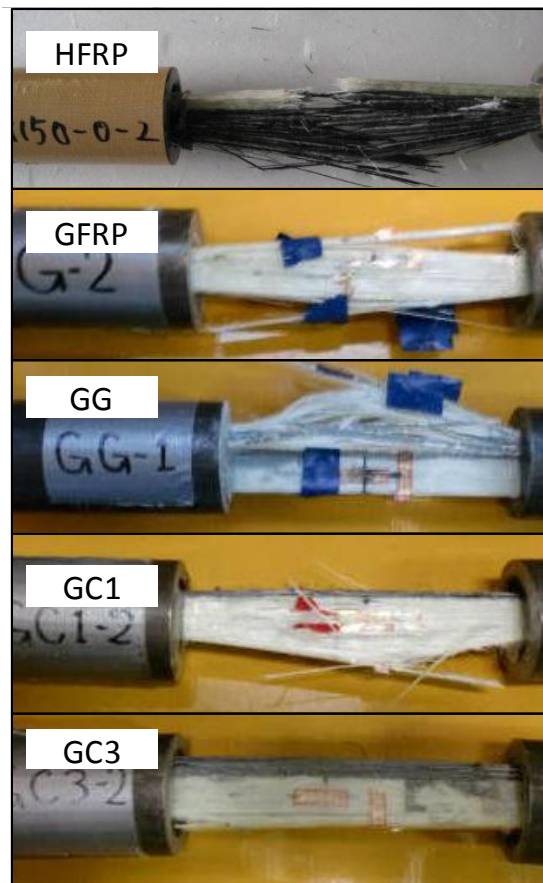


図-4 破壊状況

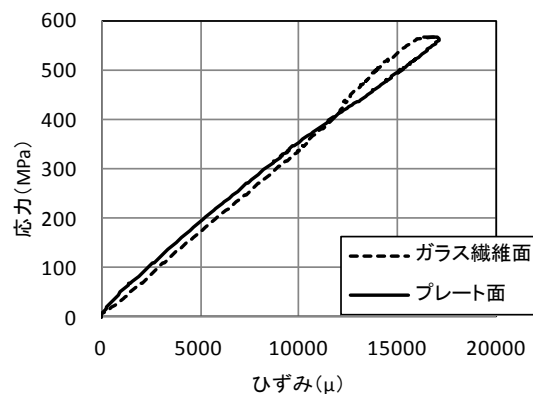


図-5 応力-ひずみ関係 (GC1)

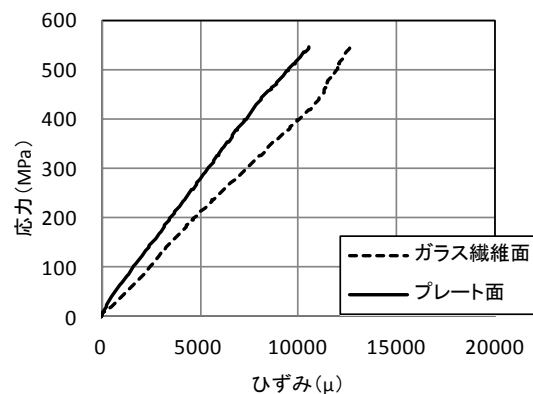


図-6 応力-ひずみ関係 (GC3)

表-5 UFC 示方配合

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

表-6 UFC 材料特性値

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

表-7 実験要因

試験体名	使用桁種	UFC セグメント目地間隔 (mm)	UFC 高さ (mm)	UFC 幅 (mm)	補強材
H-0	HFRP	0	50	135	なし
H-10	HFRP	10	50	135	なし
G-only	GFRP	—	—	—	なし
G-10	GFRP	10	35	95	なし
GG-10	GFRP	10	35	95	ガラス繊維プレート (8mm)
GC-10	GFRP	10	35	95	炭素繊維プレート (1.2mm)

3.2 実験要因

表-7 に実験要因を示す。試験体は 6 体であり、HFRP 桁を用いた試験体は UFC セグメントの間隔を実験要因に、GFRP 桁を用いた試験体は下フランジの補強の有無もしくは種類を実験要因とした。UFC 床版はプレキャストセグメント部材として製作した。UFC セグメント長さは 300mm であり 1 つの合成桁に 12 個使用した。図-7 に断面寸法を示す。ずれ止めに用いたボルトは防食性能を有する SUS304 のステンレス鋼であり UFC 打設時にボルトをあらかじめ埋め込んでいる。また、ボルト径は M16 であり、FRP 桁の上フランジに 18mm の孔をあけた後に UFC セグメントと接合した。ボルトの軸方向間隔は 150mm であり、接合にはエポキシ樹脂による接着接合を併用した。FRP 桁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 FRP 桁と UFC ブロックを接合し、接着剤が硬化する前にトルク 20Nm をボルトに導入した。UFC セグメント目地間隔について図-8 に示す。目地間隔 0mm の試験体では隣りあう UFC セグメントをエポキシ樹脂で接合させ、目地間隔 10mm の試験体ではセグメントの目地にグラウトを充填させることで一体化させた。下フランジに補強材を貼り付ける場合には試験体下フランジの長さ方向全面にエポキシ樹脂を塗布し、下フランジを上面向けた状態で補強材を貼り付け、均等に重しを載せることで一体化させた。

図-9 に載荷状況を示す。ウェブの座屈防止を目的として、幅 80mm 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。ガラス繊維プレートによる補強の場合は先に述べた引張試験で使用したのと同様 (厚さ 8mm) であり、炭素繊維プレートによる補強の場合は引張試験の結果から補強材は 1 枚 (厚さ 1.2mm) を使用した。

3.3 実験方法

載荷は 4 点載荷とし、油圧ジャッキを用いて破壊に至るまで静的単調載荷を行った。計測項目は、荷重、スパン中央のたわみ、各部位のひずみなどである。

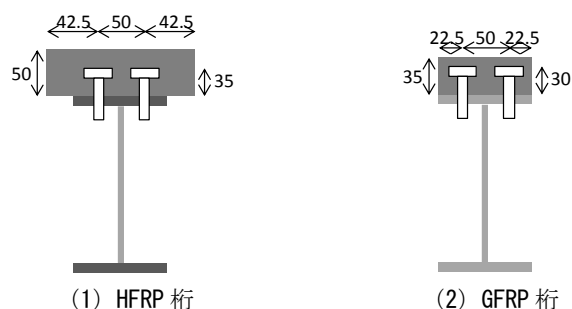


図-7 断面寸法

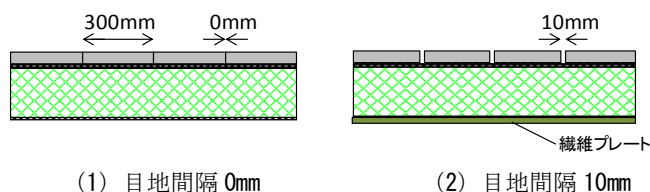


図-8 UFC セグメント目地間隔

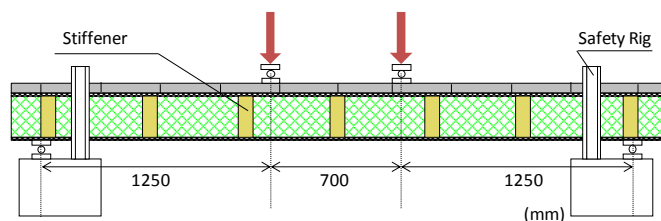


図-9 載荷状況

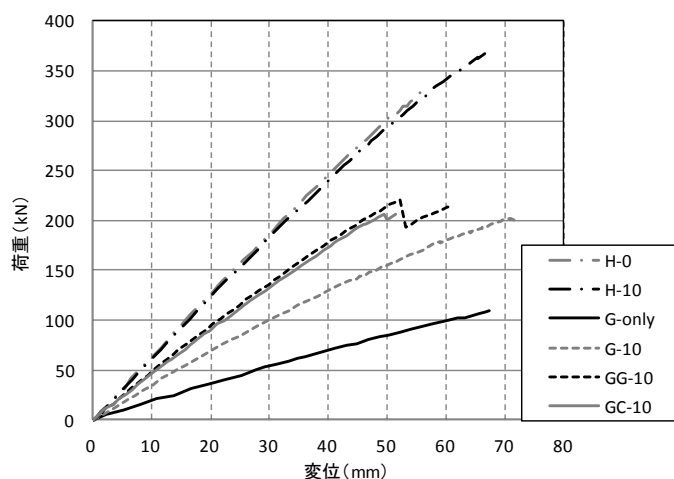


図-10 荷重-スパン中央変位関係

3.4 実験結果および考察

(1) 実験結果

図-10 に実験から得られた荷重-スパン中央変位関係を示す。この図から、H-0 と H-10 で破壊に至るまでほぼ同様の挙動を示しているため、UFC セグメントの目地間隔は耐力、剛性に与える影響は小さいものと判明した。G-only と G-10 を比較とすると、合成桁とすることで終局耐力が2倍程度、同一荷重時の変位が1/2程度と耐力、剛性ともに大きく向上したことが分かる。また、G-only の場合には上フランジでの圧縮応力による界面剥離が載荷点付近で発生した(図-12(1))。しかし、G-10 の場合にはスパン中央で UFC の圧縮破壊により終局に至っており、FRP 桁上フランジでの圧縮応力の低減、下フランジでの引張強度の有効活用を可能にしたと言える。図-11 に G-only および G-10 の荷重-上下フランジひずみ関係を示す。この図からも GFRP 桁を UFC との合成桁とすることによって、上フランジでの圧縮ひずみを7割程度低減させ、下フランジでの引張ひずみが4割程度増加していることが読み取れる。

次に G-10 と GG-10, GC-10 を比較する。耐力については GG-10 が G-10 に比べ多少大きい耐力を示したものの概ね同様であった。剛性については GG-10, GC-10 とともに G-10 に比べ3割程度増加している。引張試験結果からガラス繊維プレートは炭素繊維プレートより剛性、強度は低い、合成桁として用いた GG-10 の場合には下フランジ厚が GC-10 の1.5倍程あるため、剛性、耐力は GC-10 と同様となった。これより、フランジ厚に制限がない場合に限り、ガラス繊維を用いても炭素繊維による補強と同等の性能を発揮することが可能であることが示唆された。

H-10, G-10 の破壊形式はスパン中央での UFC の圧縮破壊であり(図-12(2))、H-0, GG-10, GC-10 の破壊形式は載荷点付近(載荷スパン内部)での UFC 圧縮破壊であった。(図-12(3), 図-12(4))

(2) Fiber model 解析との比較

Fiber Model による解析を行い、実験値との比較を行った。ここでは、終局に至るまで UFC 床版と FRP 桁にずれは生じず、平面保持が成り立つと仮定した。図-13 に UFC の圧縮応力-ひずみ関係を示す。ここで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。図中の f'_{ck} は UFC 圧縮破壊強度、 E_c は UFC ヤング係数、 γ_c は材料係数を示している。FRP の下フランジ応力-ひずみ関係は、引張試験により得られた値を線形近似して使用した。

図-14, 15, 16, 17 に実験結果と解析結果の比較を示す。H-10, G-10 については終局耐力を概ね精度よく推定出来

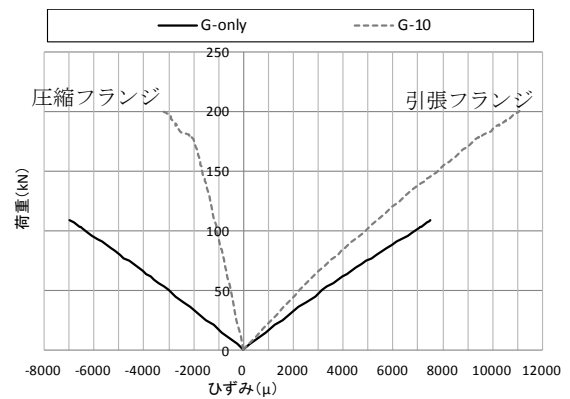


図-11 荷重-上下フランジひずみ関係



(1) G-only

(2) G-10



(3) GG-10

(4) GC-10

図-12 破壊状況

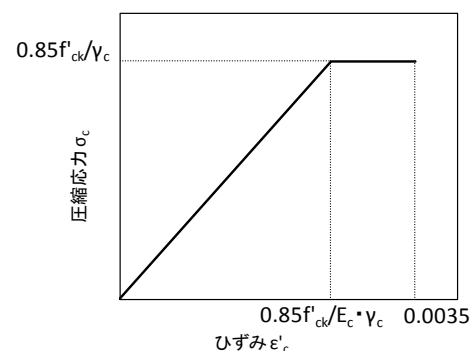


図-13 UFC 応力-ひずみ関係 (UFC 指針)

ているが、GG-10 と GC-10 では終局耐力を実験値より過大評価する結果となった。GG-10 および GC-10 については載荷点付近の破壊が確認されており、載荷点での応力集中によって早期に破壊が生じたことが原因と考えられる。また、変位について H-10 および G-10, GG-10 では終局耐力の1/3~1/2程度の荷重以降に実験値との差が確認できる。この原因として、今回の解析において FRP 材料の応力-ひずみ曲線は線形と仮定しているが、引張試験から応力の増加に伴い剛性が低下していく非線形

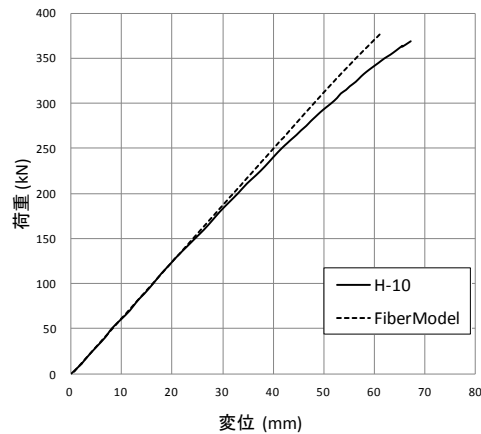


図-14 解析結果 (H-10)

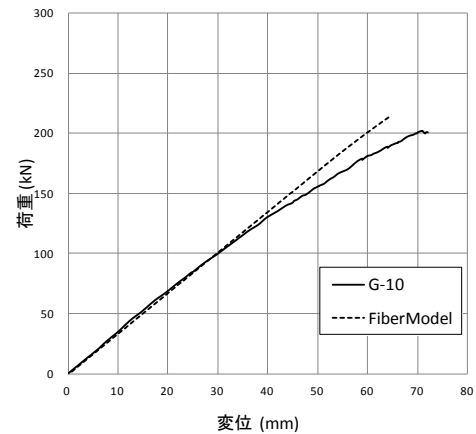


図-15 解析結果 (G-10)

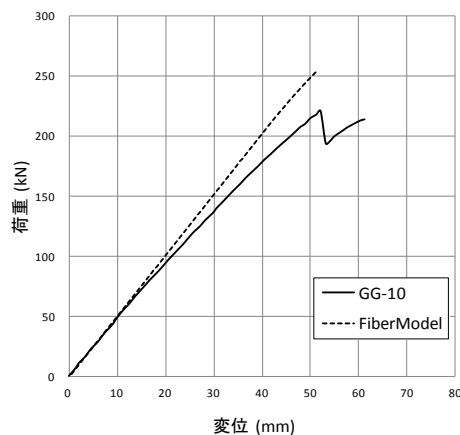


図-16 解析結果 (GG-10)

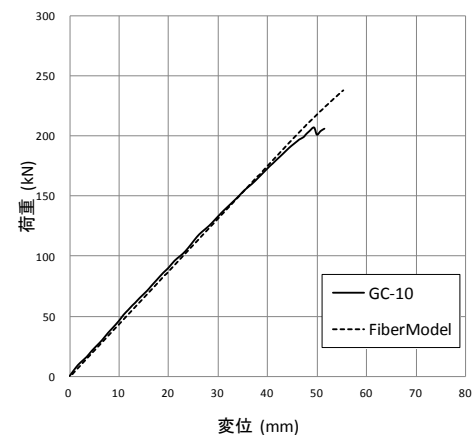


図-17 解析結果 (GC-10)

挙動が確認されているため、その影響が表れたものと考えられる。

以上のことから、Fiber Model を用いての解析により終局耐力を概ね精度良く推定できることが分かった。ただし、変位については終局耐力の 1/3～1/2 以降から生じる実験値との差異について更なる検討が必要である。

4. 結論

FRP 桁と UFC 床版からなる合成桁の開発を行うにあたり、FRP 材料引張試験と合成桁の曲げ実験を行った。本研究より得られた結論を以下に示す。

- (1) GFRP に炭素繊維プレートを用いて補強することにより強度および剛性の大幅な向上が期待できるが、過度の補強により接着面での剥離が発生する。
- (2) UFC を床版とする合成桁は FRP 桁単体に比べ、耐力が 2 倍以上、変位が同一荷重時で 1/2 になることが確認された。
- (3) 合成桁とすることで、上フランジでの圧縮ひずみを 7 割程度低減、下フランジでの引張ひずみを 4 割程度増加させることができ、FRP の特性を有効活用することが可能となった。

- (4) Fiber Model を用いて解析を行った。合成桁の終局耐力は概ね推定可能であることが確認された。

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、プロジェクト関係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) の協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP 橋梁—技術とその展望—，構造工学シリーズ 14，2004.1
- 2) H. Mutsuyoshi et.al: Development of New Hybrid Composite Girders Consisting of Carbon and Glass Fibers, COBRAE CONFERENCE 2007
- 3) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー113，2004.9