

# 論文 ハイブリッド 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

白木 健亮<sup>\*1</sup>・睦好 宏史<sup>\*2</sup>・Nguyen Duc Hai<sup>\*3</sup>・石濱 達也<sup>\*3</sup>

**要旨** : CFRP と GFRP から構成されるハイブリッド FRP 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 桁と超高強度繊維補強コンクリート (UFC) 床版を組み合わせたハイパフォーマンス合成桁の開発を行うために, ボルト接合による押し抜きせん断実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, ハイブリッド 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炭素繊維の高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, 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 (炭素繊維強化プラスチック) と GFRP (ガラス繊維強化プラスチック) から構成されるハイブリッド FRP (以下, HFRP) に着目した。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能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。

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<sup>1)</sup>。また, HFRP による I 桁の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, 高い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<sup>2)</sup>。本研究は, FRP を実橋梁に適用するために, 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 の高強度をできるだけ活用し, 3) FRP の高耐食性と軽量性を兼ね備えた新しい高性能な複合桁を開発するものである。すなわち, 超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC) と HFRP 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  $180\text{N/mm}^2$  という高い圧縮強度を有し, また高強度の鋼繊維を含むため, 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軽量性が確保できる。本研究では I 型 HFRP 桁と UFC 床版からなる合成桁の開発を行うにあたり, ボルト接合を用いた押し抜きせん断実験および HFRP と UFC 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. 押し抜きせん断実験概要

### 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部は CFRP と GFRP, 比較的作用応力の小さいウェブ部は経済性を考慮し GFRP のみで構成されている。HFRP 桁は全高 250mm, 幅 95mm フランジ厚 14mm ウェブ厚 9mm である (図-1)。表-2

表-1 HFRP 積層構成

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

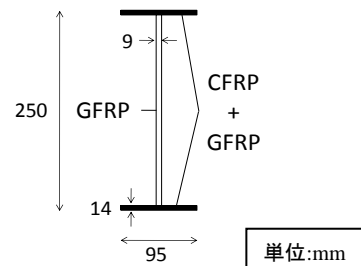


図-1 HFRP 桁寸法

\*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)

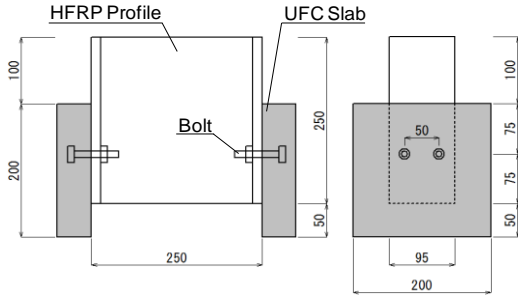
\*3 埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム工学系専攻

表-2 HFRP 材料特性値

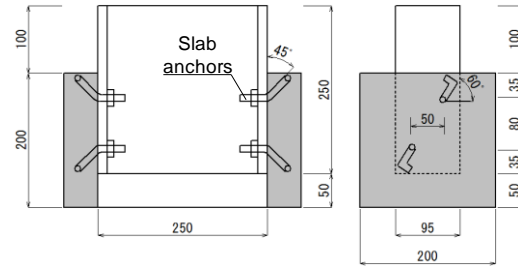
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
フランジ	394	884	49.6
ウェブ	299	185	17.8

表-3 UFC 標準配合

空気量 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				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



(1) ボルト接合供試体



(2) スラブアンカー供試体

単位:mm

図-2 押し抜きせん断供試体形状寸法

表-4 実験要因

供試体名	ずれ止め	エポキシ 樹脂	ブロック 厚(mm)	ボルト埋込 み長(mm)
10BE-50-35	M10 ボルト	○	50	35
16BE-50-35	M16 ボルト	○	50	35
16B-50-35	M16 ボルト	—	50	35
SA-50-35	スラブアンカー	—	50	35
10BE-35-30	M10 ボルト	○	35	30
16BE-35-30	M16 ボルト	○	35	30
10BE-35-20	M16 ボルト	○	35	20



図-3 載荷状況

表-5 UFC 材料特性値

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
173	14.3	48.6

に積層理論から求めた HFRP の力学的特性を示す。

## (2) UFC

本実験に用いた UFC の標準配合を表-3 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°C の蒸気養生を 24 時間行った。

## 2.2 実験要因

本実験では HFRP と UFC の合成構造に適した接合方法を開発すること及びその挙動を実験的に把握することを目的とした。ずれ止めは、鋼コンクリート合成桁、非合成桁で一般的に用いられている頭付きスタッド、スラブアンカーを模してボルトおよびそれを加工したものを使用した。ずれ止めを用いたボルトおよびスラブアンカーは防食性能を有する SUS304 のステンレス鋼である。

図-2 に供試体概要を、表-4 に実験要因を示す。本実験では、超高強度材料を使用すること、接着剤を使用するため、接着面積を制御する必要があったため、UFC ブロックは幅および高さ 200mm とし、厚さは 4 章で述べ

る合成桁曲げ実験供試体と同様の 50, 35mm の 2 種類とした。また、ブロック厚 35mm の供試体についてはボルトの埋め込み長を 35mm, 20mm と変化させた。ボルト径は M10 と M16、スラブアンカーはφ10 である。ずれ止め形状に加え、HFRP 桁と UFC ブロック接触面のエポキシ樹脂による接着接合の併用の有無を実験要因とした。全ての供試体においてトルク 20Nm をボルトに与えて締め付けた。UFC ブロックは、型枠底面に孔をあけ、ボルトを予め固定した状態でコンクリートの打設を行った。打設は接合面を底面とし、一方向に移動させながら打設し、内部振動機は使用しなかった。HFRP 桁の両フランジに、M10 ボルトには 10.5mm, M16 ボルトには 17mm の孔をあけ、UFC ブロックと接合した。接着接合を併用する供試体は FRP 桁表面をサンドペーパーで荒く研磨し、接着剤を塗布したのち 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をボルトに導入した。

## 2.3 実験方法

図-3 に載荷状況を示す。油圧ジャッキを用いて静的載荷を行った。荷重、ボルト周辺の FRP および UFC ひずみ、ボルト水平レベルでの HFRP 桁と UFC ブロックの相対変位を載荷開始から終局に至るまで計測した。

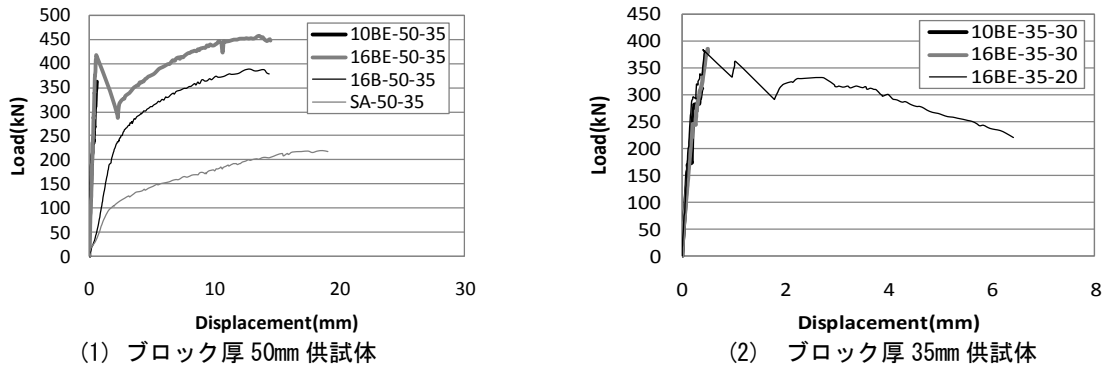


図-4 荷重-変位関係

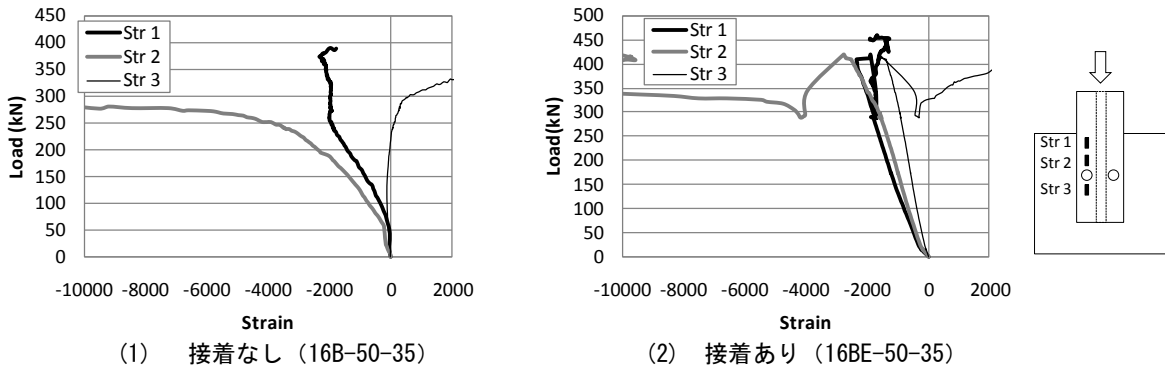


図-5 荷重-ひずみ関係

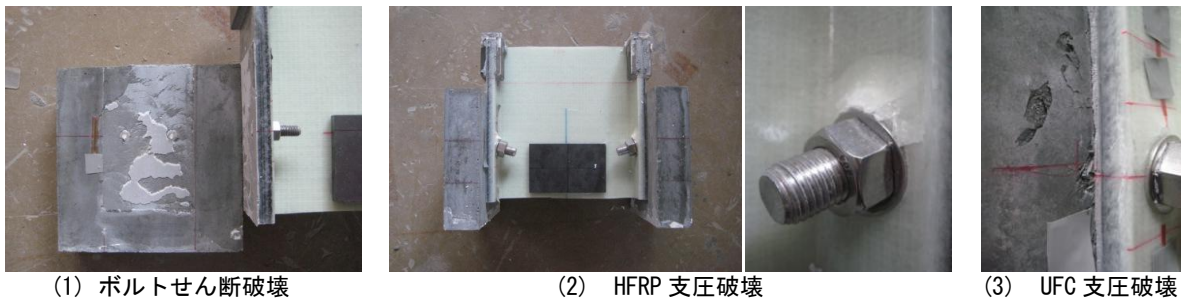


図-6 破壊状況

#### 2.4 押し抜きせん断実験結果および考察

UFC の圧縮試験結果を表-5 に示す。引張強度は、JCI にて公開されている曲げ試験の逆解析プログラムを使用して算出した<sup>3)</sup>。

図-4(1)にブロック厚が 50mm、図-4(2)にブロック厚 35mm の供試体から得られた荷重-ずれ変位関係をそれぞれ示す。ここで、ずれ変位とは HFRP 桁と UFC ブロックの相対変位を表す。これらの図から、接着接合を併用しない場合 (10B, SA 供試体) は荷重初期段階からすべりが発生し、大きなずれ変位が生じていることが分かる。中でも SA 供試体は大きな変形性能を示した。これはスラブアンカーの形状に起因し、コンクリート内部で回転が生じたためと考えられる。破壊モードは、10BE 供試体のみが接着剤の剥離と同時に生じたボルトのせん断破壊が生じ (図-6(1))、それ以外は HFRP の支圧破壊 (図-6(2)) となった。16BE 供試体では、400kN 付近で接着剤剥離が生じ、その後ボルトがせん断荷重を負担したため、16B 供試体と同様な傾向を示した。ボルト周

辺のひずみについて考察すると、図-5(1)に示すように接着剤がない供試体では、ボルト下部のひずみが非常に小さく、ボルト直上のひずみが大きな値を示している。これは HFRP 桁と UFC ブロック界面ですべりが生じ、ボルトが HFRP に接触したためである。一方接着剤を使用した場合 (10BE, 16BE 供試体) では、接着剤剥離以前にそのような傾向は見られず、HFRP 桁と UFC ブロックが一体となって挙動していることが分かる (図-5(2))。

次にブロック厚が 35mm 供試体の結果について述べる。破壊モードは 10BE 供試体でボルトのせん断破壊、16BE-35-30 供試体は FRP の支圧破壊、16BE-35-20 供試体は UFC の支圧破壊 (図-6(3)) が生じた。16BE-35-30 供試体は接着剤が剥離した際の衝撃で変位計が外れ、その後の相対変位を計測することが不可能となったが、荷重は 450kN まで増加した。荷重-変位関係および破壊モードは 16BE-50-35 供試体と同様であった。ボルト埋め込み長を 20mm とした場合には UFC の支圧破壊が生じたため、接着剤の剥離後荷重の増加は見られず、緩やかな

表-6 実験要因

供試体名	ずれ止め	エポキシ樹脂	床版幅(mm)	床版厚(mm)	ボルト埋込み長(mm)
B-135-50	M16 ボルト	—	135	50	35
SA-135-50	スラブアンカー	—	135	50	35
BE-95-50	M16 ボルト	○	95	50	35
BE-135-35	M16 ボルト	○	135	35	30
BE-135-50	M16 ボルト	○	135	50	35

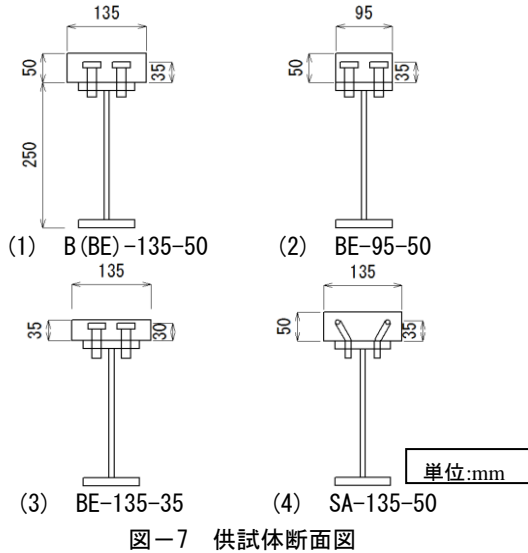


図-7 供試体断面図

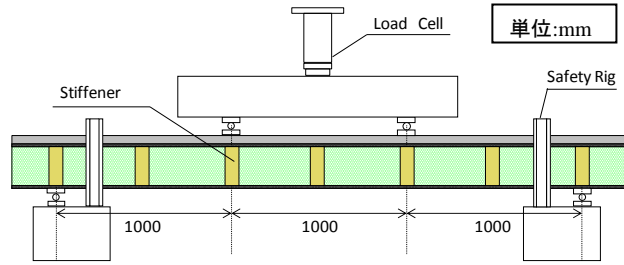
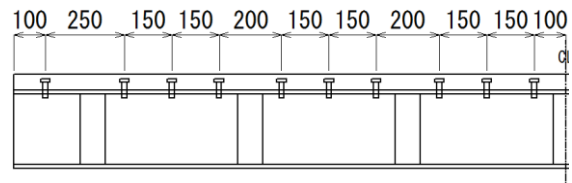
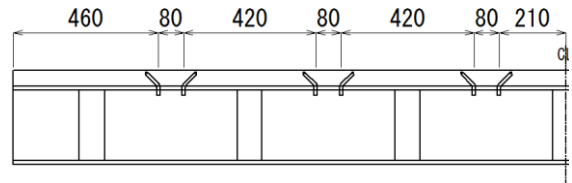


図-8 荷況



(1) ボルト供試体



(2) スラブアンカー供試体

図-9 ずれ止めの配置

表-7 UFC 材料特性値

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
182	11.9	46.1

減少が見られた。

以上のことから、本研究での範囲内では、エポキシ樹脂接着剤を併用し、ボルト埋め込み長は 30mm 以上が必要であることが明らかとなった。また、施工性を考慮した場合、ボルト本数が少ないほうが有利であるため、合成桁の供試体では M16 ボルトを使用することとした。

### 3. HFRP と UFC からなる合成桁曲げ荷重実験

#### 3.1 使用材料

使用した HFRP 桁、UFC は押し抜きせん断実験のものと同様である。

#### 3.2 実験要因

表-6 に実験要因を示す。試験体は 5 体で、UFC の断面寸法、ずれ止めの種類、接着接合の有無を要因とした。図-7 に供試体断面図を、図-8 にセットアップ図をそれぞれ示す。UFC 床版は押し抜きせん断試験体と同様にプレキャスト部材として製作した。供試体全長は 3500mm で荷重スパン、せん断スパンともに 1000mm とした。ウェブの座屈防止を目的として、幅 80mm の木製のスティフナを 500mm 間隔でエポキシ樹脂によって接着した。ボルトは接合部での破壊が生じないよう、各スティフナ間に 6 本配置した。スラブアンカーは 2 本 1 組を 500mm 間隔で配置した (図-9)。

#### 3.3 実験方法

図-8 に荷況を示す。荷重は 4 点荷重とし、油圧ジャッキを用いて破壊に至るまで静的単調荷重を行った。

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。

#### 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-スパン中央たわみ関係を示す。また、HFRP 桁単体の荷重-たわみ関係も同時に示す。この図から、ボルトをずれ止めとした供試体は HFRP 単体桁に比べ剛性、耐力ともに大きく向上したことが分かる。中でも接着剤を併用した供試体はボルトのみに比べ剛性が 15% 程度増加した。

図-11~13 にスパン中央における供試体高さと同軸方向ひずみ分布の関係を示したものである。接着剤がない場合は UFC 底面と HFRP 上フランジのひずみに大きな差が見られ、すべりが発生していることが分かる。一方接着剤がある場合にはひずみは直線的に分布していることから、接着剤を併用した供試体は終局に至るまでほぼ完全合成とみなせるといえる。せん断スパンでの HFRP

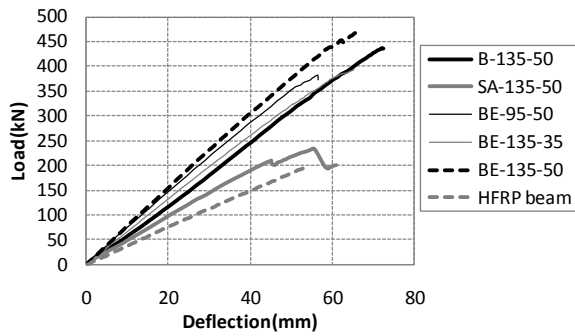


図-10 荷重-たわみ関係

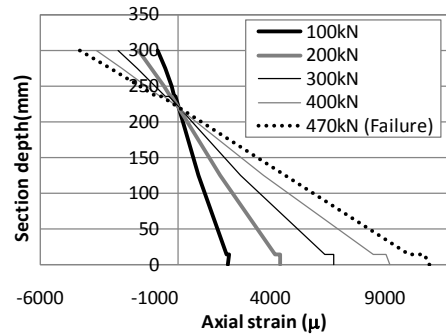


図-11 スパン中央ひずみ分布 (BE-135-50)

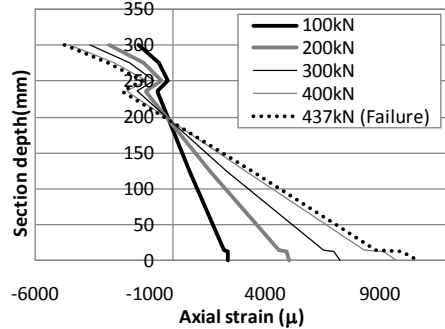


図-12 スパン中央ひずみ分布 (B-135-50)

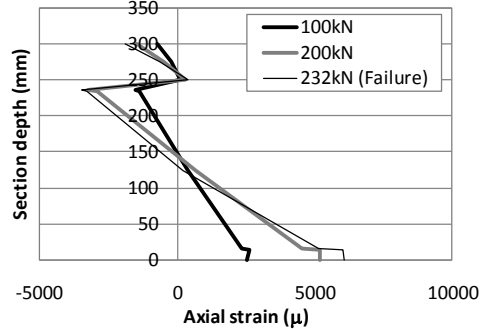


図-13 スパン中央ひずみ分布 (SA-135-50)

上フランジにおけるボルト周りのひずみからも、接着剤がない場合はすべりが発生し、ボルトが穴に接触してひずみが大きくなっていることが分かる (図-14(1))。一方、接着剤がある場合はそのような傾向は見られなかったことから、水平せん断力が作用する位置においても接着剤の有用性が確認された (図-14(2))。

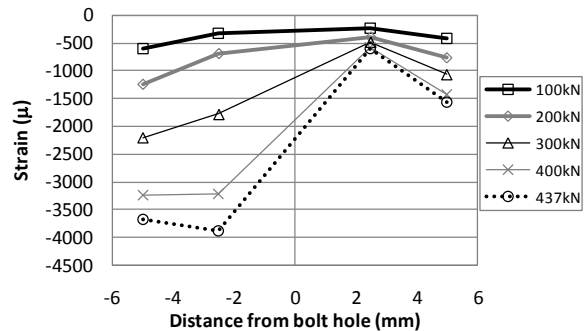
SA 供試体の破壊モードは FRP 圧縮フランジの界面剥離であった (図-15(1))。これは HFRP 単体桁と同じ破壊モードといえるが、UFC 床版があるため、瞬時に破壊するような脆性的な破壊ではなかった。また、押し抜きせん断試験では HFRP の支圧破壊が確認され、アンカーが破断することはなかったが、桁曲げ試験ではいくつかのアンカーが破断していた。その他の供試体の破壊モードはすべて載荷点外での UFC の圧縮破壊であった (図-15(2))。

### (2) Fiber model 解析との比較

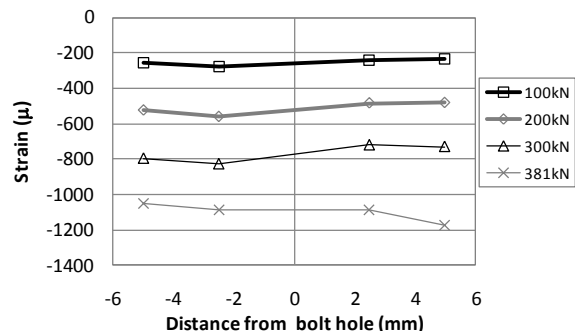
Fiber Model による解析を行い、実験値との比較を行った。ここでは、終局に至るまで UFC 床版と HFRP 桁にずれは生じず、平面保持が成り立つと仮定した。図-16 に UFC の圧縮応力-ひずみ関係を示す。Model 1 は超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案) <sup>4)</sup> (以下、UFC 指針) より、Model 2 は圧縮試験結果を式(1)の関数でモデル化したものである。

$$\sigma = \sigma_c \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \cdot \frac{n}{(n-1) + (\varepsilon/\varepsilon_{c0})^n} \quad (1)$$

ここに



(1) 接着なし



(2) 接着あり

図-14 せん断スパン内 HFRP 上フランジのひずみ分布



(1) HFRP 界面剥離 (2) UFC 圧縮破壊

図-15 破壊状況

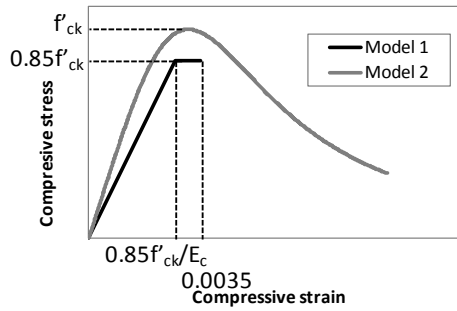


図-16 UFC 圧縮応力-ひずみ関係

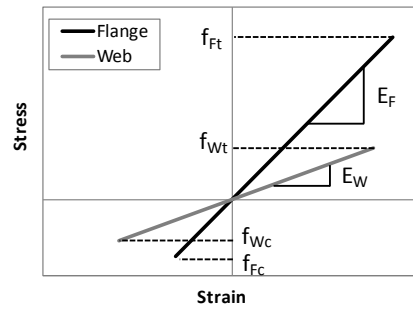


図-17 HFRP 応力-ひずみ関係

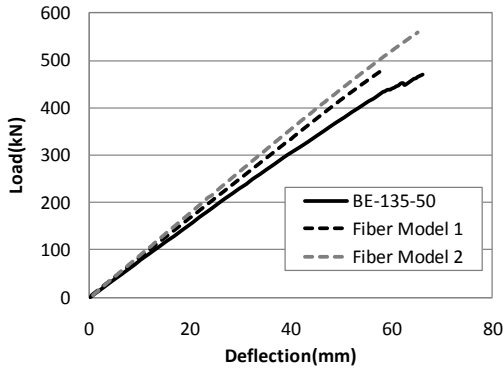


図-18 解析結果

$\sigma_c$  : UFC 圧縮強度

$\varepsilon_{c0}$  : UFC の降伏ひずみ

$n$  : 定数(ここでは3とした)

引張応力-ひずみ関係は UFC 指針において提案されている関係を用いた。

HFRP の応力-ひずみ関係を図-17 に示す。これらは積層理論から求められた理論値(表-2)で、フランジを構成する HFRP、ウェブを構成する GFRP について示している。

図-18 に実験結果と解析結果の比較を示す。Model 2 を用いて解析した結果が Model 1 を使用したものより差が大きかった。Model 2 で関数化した応力-ひずみ関係では終局までをひとつの曲線としてモデル化している。しかし、合成桁曲げ載荷実験において UFC 床版は終局荷重時までほぼ線形挙動を示していたことから、最大荷重後も応力を受け持つとした Model 2 では圧縮応力を過大評価していることが原因であるといえる。一方、UFC 指針を使用した解析では、終局耐力は概ね精度よく推定できているが、たわみに若干のずれが見られる。これは解析においては曲げスパン内がもっともひずみが大きくなるのだが、実験では、載荷点近傍で応力集中が発生しひずみが最大となり、破壊が載荷点側で起きたことによると考えられる。

#### 4. 結論

UFC を床版とした HFRP との合成桁の開発を行うにあたり、押し抜きせん断実験と梁の曲げ実験を行い、その曲げ性状について検討した。本研究より得られた結論を以下に示す。

- (1) ボルトをずれ止めとした押し抜きせん断実験から、接着剤を併用することで、ずれを抑制することができた。また、ボルトの埋め込み長により破壊モードが変化することを確認した。
- (2) UFC を床版とする合成桁は HFRP 桁単体に比べ、耐力が2倍以上になることが確認された。
- (3) ボルトとエポキシ樹脂をずれ止めとした場合、ボルトのみに比較し、桁曲げ剛性が約15%向上した。
- (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

本研究を行うにあたって、サクセム研究会から多大なるご支援を頂きました。また、UFC の製作にあたって、ジオスター(株)の協力を、実験を行うにあたって、埼玉大学卒研生の大川祥功君の協力頂きました。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「サクセム」の技術評価報告書，技術推進ライブラリーNo.3，2006.11
- 4) 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