

CFRP - コンクリート合成桁の曲げ挙動特性に関する実験的検討

Static Bending Test of Hybrid CFRP-Concrete Bridge Superstructure

杉浦邦征* 北川淳一** 大島義信*** 小野紘一**** 小牧秀之***** 北根安雄*****

Kunitomo SUGIURA, Jun-ichi KITAGAWA, Yoshinobu OSHIMA, Koichi ONO, Hideyuki KOMAKI and Yasuo KITANE

* Ph.D., 京都大学大学院助教授, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

** 工修, 三菱重工業(株), 広島製作所橋梁・鉄構部 (〒733-8553 広島市西区観音新町 4-6-22)

*** 博士(工学), 京都大学大学院助手, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**** Ph.D., 京都大学大学院教授, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***** 工修, 新日本石油(株), 新エネルギー本部新商品事業部 CF 事業室 (〒105-8412 東京都港区西新橋 1-3-12)

***** Ph.D., Simpson Gumpertz & Heger, Inc. (41 Seyon St, Building #1, Suite 500 Waltham, MA 02453, USA)

The objective of this study is to examine the proposed Hybrid CFRP-Concrete bridge superstructure experimentally, which consists of CFRP girders with a trapezoidal cross section, precast concrete slab and Carbon fiber sheets. Bending tests are carried out in order to assess the failure mechanism and the strength. It is understood from the loading tests that the proposed structure shows a good performance; namely, the installed concrete layer prevents the local deformation of CFRP and the failure can be categorized by (a) compressive failure of concrete, (b) adhesive failure between concrete and CFRP box, (c) shear failure between CFRP boxes and (d) buckling of the CFRP upper flange. A comparison of weight and life-cycle cost is also made between the proposed Hybrid CFRP-Concrete bridge superstructure and the ordinary Steel-Concrete bridge superstructure. It concludes that as for the total weight of superstructure, drastic reduction is observed, and that this significant weight reduction leads to the shortening of construction period, the simplification of substructures.

Key Words: Carbon Fiber Reinforced Polymers, Concrete, Composite Girder, Bending, Strength, Buckling

キーワード: 炭素繊維強化複合材料, コンクリート, 合成桁, 曲げ, 強度, 座屈

1. 概要

繊維強化複合材料 (Fiber Reinforced Polymers: 以下, FRP と略す) は, 軽量かつ高強度な新素材で, 耐腐食性に富む特性から, 宇宙・航空産業, 船舶産業を中心として開発が進められてきたが^{1,2}, 近年では, 多様なものの造りの素材としての活用が期待が高まっている。このような状況下, 建設関連では, 浴室, 空調設備, 窓枠などの住宅関連設備の成形体として多用されるようになってきているものの, 建築物・橋梁などの本体構造においては, 損傷・劣化部位に対する補修・補強材としての活用にとどまっている^{3,4}。しかし, 現有の重量比強度に優れた鋼材にかわり FRP 材を活用することで, 建設工事における施工の合理化・省力化が可能であり, また供用時のメンテナンスフリーの優れた条件から, これまで鉄筋・鉄骨を用いてきた構造体の大スパン化が可能と考えられ, 多様な研究開発が進められている。さらに, FRP 材の多くの優れた特性を活かすことで, 既存の構造形態を模倣するのみでなく, 新たな構造形態の創造に期待が高まりつつあるのも事実である。

従来, FRP 構造体の開発研究は, ハンドレイアップ成形法による航空・船舶・機械分野で先駆的に行われていた。すなわち, 一品生産が主であり, 複合則, 積層板理論に基

づく線形弾性解析により, 材料設計・形態設計が一括して行われていた^{5,6}。しかし, 連続引抜成形法の技術が確立されると, 均質で大断面の箱形, H 形, 円形等の型材の大量生産が可能となり, 建設構造分野での「鉄骨の代替」としての研究開発が盛んになった。すなわち, 大空間屋根構造や橋梁に FRP 構造材を利用する応用研究が行われはじめた⁷⁻¹³。このような実用化に際しては, 鋼構造の座屈設計, ならびに継手接合部の設計に準ずる研究開発が主流ではあるが^{14,15}, 強化繊維に光ファイバセンサを組み入れることで構造体内部の損傷をモニタリングできるスマート構造体に関する研究開発も進められるようになってきた¹⁶。

さて, FRP 構造体の力学的挙動に関する最近の研究としては, 著者らによる, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) による中空正方形断面部材および H 型断面部材の圧縮・曲げ強度に関する実験的・解析的検討が挙げられる^{17,18}。ここでは, 土木構造物が大型構造物であり, 多積層構造体として捉える必要があり, 力学的挙動に及ぼす法効果の影響を明らかにする必要があることを指摘している。また, 著者らは, 積層構造体の弱点である層間剥離を生じさせ難くする強化繊維の 3 次元組上げを取り入れたブレードニング成形法の適用性を検討している¹⁹。さらに, 木嶋らは, 安価な GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers)

を主要材料として、高比強度・高比剛性の特徴を有する CFRP を限定的に貼り合わせ、部材性能を改善しようとしたハイブリッド FRP 構造部材に着目し、その特性を左右する接着面のせん断付着強度に関して検討している²⁰⁾。一方、橋梁構造物としては、明嵐らにより FRP 吊橋の経済性の検討²¹⁾、山田らによる FRP 歩道橋の振動特性の検討²²⁾、前田らによる FRP 歩道橋の設計と使用性²³⁾など、FRP 材の橋梁への適用に関する基礎的・実務的検討が多く見られるようになった。これは、わが国最初の FRP 歩道橋が 2000 年に沖縄で設計・施工されたことによる²⁴⁾。設計・施工の詳細は、文献[25, 26, 27]を参照されたい。また、海外においても大量生産が可能な引抜成形材のモジュール化により多様なデッキ構造の開発が進められている²⁸⁾。

そこで、本研究では、Kitane らが提案した GFRP-コンクリートハイブリッド桁構造²⁹⁾を参照して、より高性能な CFRP を用いた CFRP-コンクリートハイブリッド桁構造の小型モデルを製作し、曲げ載荷試験によりその変形状ならびに破壊性状を検討した。さらに、既存の鋼-コンクリート合成桁橋梁に準じた CFRP-コンクリートハイブリッド桁のプロトタイプを試設計し、汎用有限要素解析プログラム ABAQUS³⁰⁾による検証も含め、その経済性の概略比較を行い、CFRP-コンクリートハイブリッド桁の実用性を検証した。

2. 載荷実験の概要

2.1 CFRP-コンクリートハイブリッド桁構造の概要

(1)断面構造および CFRP の積層

本研究では、図-1 に示すような CFRP-コンクリートハイブリッド桁構造について検討する。FRP 材は、積層構造にも依存するが、一般にせん断弾性係数が小さいので、せん断変形・ねじり変形に対する配慮が必要で、サンドイッチ構造とするか箱断面を桁構造に採用するのが望ましいと言われている。また、引抜成形法による形材を組み合わせることで多様な大断面を簡単に構成できるような基本単位（ユニット構造化）を設計することで、高価な FRP 材ではあるものの大量機械化生産によるコストダウンを実現し、橋梁等の大規模構造物への適用が可能と考えられる。この場合、接着による基本ユニットの組み立てが基本であり、接着された複数ユニットの一体性を確保するには、その接着面を大きくすることが望ましく、Kitane らの研究成果を

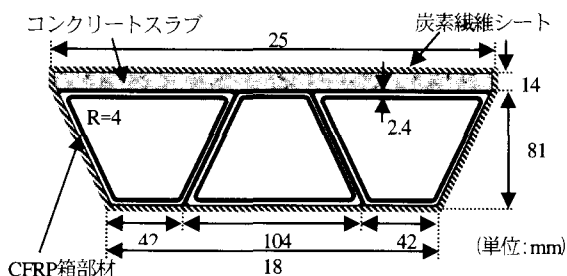


図-1 CFRP-コンクリートハイブリッド桁断面

参考に、同桁高に対して接着面延長が大きく、角部にできるだけ鋭角を作らない台形断面を採用した。

台形断面 CFRP 部材は、弾性係数 230(kN/mm²)、引張強度 3400(N/mm²)の一方炭素繊維シートと弾性係数 8.5(kN/mm²)、引張強度 40(N/mm²)のエポキシ系樹脂を用い、繊維の体積含有率を 60%に設定して、シートワインディング成形法により積層化して製作した。ここでは、表-1 に示すとおり積層構造の部材軸方向の縦弾性係数とせん断弾性係数の関係を考慮して、積層板としての平均的なせん断弾性係数を維持しつつ、縦弾性係数をより繊維の縦弾性係数に近づけられるよう、総繊維の 70%の繊維を部材軸方向に配置した。なお、スパン 50m、有効幅員 7m 程度の実橋梁寸法に対して約 1/20 の縮尺率でモデル構造を検討した。

表-1 積層構造の有効弾性係数（積層理論による）

検討 ケース	45° 繊維 の含有率	E ₁ (kN/mm ²)	E ₂ (kN/mm ²)	G ₁₂ (kN/mm ²)	E ₁ /G ₁₂
1	50	87.2	24.4	17.4	5.0
2	30	106.4	18.5	19.6	5.4
鋼材	—	206	206	79	2.6

注) E₁: 部材軸方向の縦弾性係数, E₂: 部材軸直角方向の縦弾性係数, G₁₂: せん断弾性係数

(2)ハイブリッド桁の製作手順

ハイブリッド桁の製作手順を図-2 に示す。まず、シートワインディング成形法で製作された台形断面 CFRP 部材のウェブ同士をエポキシ系接着剤（引張弾性係数 3.29(kN/mm²)、引張強度 53(N/mm²)、圧縮強度 0.167(N/mm²)、せん断付着強度 19.6(N/mm²)、引張付着強度 7.7(N/mm²)）で貼り合わせ、CFRP 桁を製作する。次に、あらかじめ製作したコンクリートスラブを CFRP 桁に、前述の接着剤により貼り合わせる。最後に、一方炭素繊維シートを部材軸直角方向に巻き立てて（2層巻き立て、1層あたりの層厚は 0.167mm）、CFRP 桁およびコンクリートスラブに一体性を確保するようにした。なお、コンクリートスラブには、合計 8 箇所孔あけが行われており、アルミ製直方体のせん断キーを接着した。

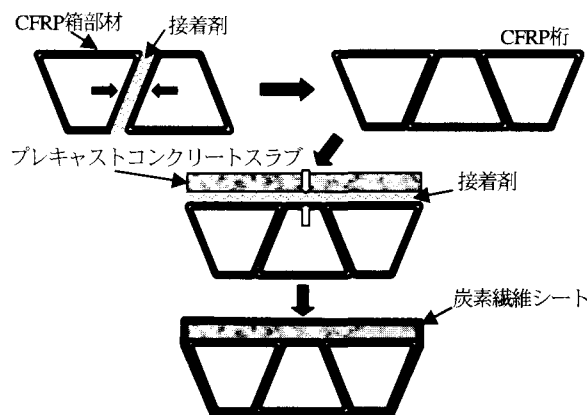
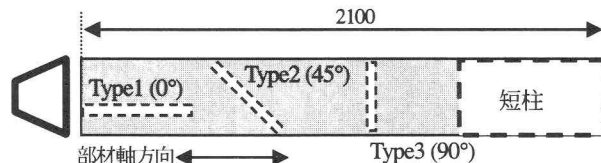


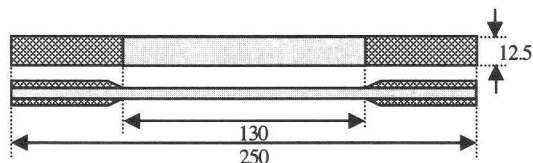
図-2 CFRP-コンクリートハイブリッド桁の製作手順

2.2 材料試験結果

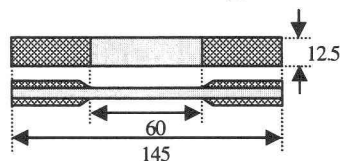
製作した 2.1m の CFRP 桁の実際の弾性物性ならびに強度を算定するため、図-3(a)に示すように部材軸方向 (0° : Type1), 部材軸に対して 45° 方向 (Type2), 部材軸直角方向 (90° : Type3), の各引張試験片を 3 体ずつ切り出すとともに、圧縮試験用の CFRP 短柱を切り出し製作した。なお、コンクリートスラブについては、別途円柱試験体 (直径 10cm, 高さ 20cm) を製作し、圧縮試験、割裂試験から、弾性係数 $21.6(\text{kN/mm}^2)$, 圧縮強度 $43.2(\text{N/mm}^2)$, 引張強度 $3.0(\text{N/mm}^2)$, ポアソン比 0.19 を得た。



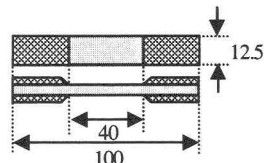
(a) 引張試験片の切り出し方向および短柱切り出し位置



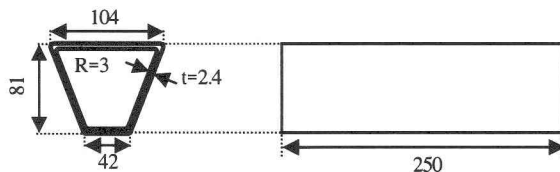
(b) 引張試験片: Type1



(c) 引張試験片: Type2



(d) 引張試験片: Type3



(e) 圧縮試験: CFRP 短柱

図-3 材料試験片の形状 (寸法単位: mm)

(1) 引張試験結果

引張試験は、試験片中央部に 2 軸ゲージを 2 枚貼り付け、万能試験機を用いて $1(\text{mm/min})$ の荷重速度により実施した (図-4 を参照)。ここで、Type1~3 の試験片に対する試験結果をまとめて表-2 に示す。例えば、 0° および 45° 方向の引張弾性係数は積層理論による理論値とほぼ同じであるが、Type3 の引張試験より換算したせん断弾性係数については、大幅に小さい値となり、試験法なども含め再検討が

必要と考えられる。特に、 90° 方向に繊維を配置しない積層構造であるため、引張試験片全長にわたって繊維の連続性が無く、早期に伸び変形の非線形性が発生し、弾性係数も理論値を下回る結果となったと考えられる。なお、参考までに、破断状況を図-5 に示す。

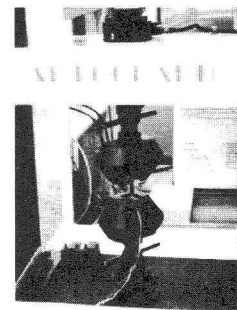


図-4 引張試験状況

表-2 引張試験結果

試験片	弾性係数 (kN/mm^2)	引張強度 (kN/mm^2)	破断ひずみ
Type1	99.2 (106.4)	1.87	0.0172
Type2	17.0 (18.50)	0.057	0.0051
Type3*	12.95 (19.6)	0.211	0.0207

() 内の数値は積層理論による理論値を示す

*Type3 に対しては、せん断ひずみに換算して評価¹⁾

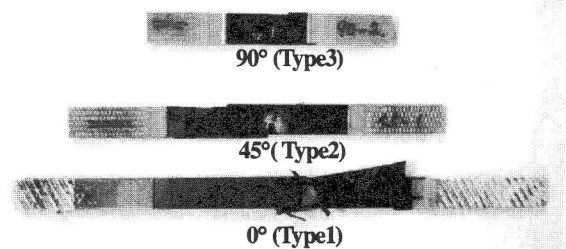


図-5 引張破断状況

(2) 圧縮試験結果

圧縮試験から得られた圧縮弾性係数は、 $90.28(\text{kN/mm}^2)$ であり、引張弾性係数より約 10% 小さい値となった。圧縮弾性係数が引張弾性係数より小さいのは、CFRP 材の特徴ではあるが¹⁷⁾、本研究で検討するようにコンクリートとのハイブリッド桁とし、圧縮力をコンクリートに分担させることでこの弱点を克服できるものと考えられる。また、圧壊時の最大圧縮力は $138.2(\text{kN})$ であり、応力換算値で $0.18(\text{kN/mm}^2)$ となり引張強度と比べて極めて小さい値となっている。さらに、初期破壊は、一番広幅なフランジ部の座屈に始まり、次に幅広なウェブ部の座屈が続き、最終的に圧壊した (図-6 を参照)。なお、初期座屈時の応力は、圧縮強度の約 60% (ひずみで約 1000μ) に留まっている。

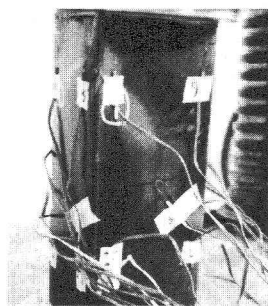


図-6 圧縮破壊状況

(3)CFRP 桁の曲げ試験結果

CFRP 桁の曲げ挙動を明らかにするために、CFRP 桁単独の曲げ試験を実施した。図-7に曲げ試験の概要を示す。スパン中央部の変位と荷重の関係、および 1/4 スパン断面 (B 断面) の曲げによる軸ひずみの分布性状をそれぞれ図-8、図-9 に示す。

図-8 において、実験から得られたたわみ剛性を、初等梁理論による剛性と比較すると、かなり小さい値であることが分かる。この理由として、梁のせん断変形が挙げられる。図中には、シェル要素を用いた ABAQUS(FEM)の結果も示しているが、実験結果との整合性は良い。FEM 解析結果は、せん断変形を考慮した理論解と考えることができ、単にスパン/桁高比のみにより、せん断変形を考慮した梁理論を適用すべきかどうか判断するのは問題で、梁を構成する材料のせん断弾性係数も考慮して判断する必要があると考えられる。

図-9 から、曲げによる軸ひずみ分布は、断面内で線形分布しており、平面保持の仮定が成り立つと言える。ただし、スパン中央部 (A 断面) においては、引張側・圧縮側最外縁で若干の乱れがあった。なお、曲げ試験における破壊は圧縮フランジの座屈によるものであり、圧縮側フランジでの軸ひずみは、約 1000μ あたりで反転し、短柱圧縮試験結果の座屈時のひずみの値と整合している。

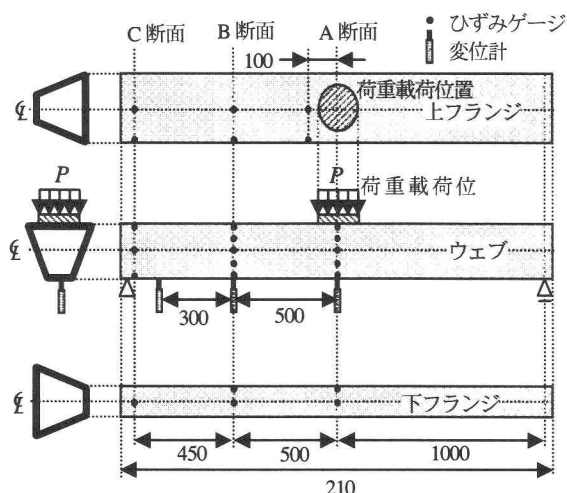


図-7 CFRP 桁の曲げ試験の概要 (寸法単位: mm)

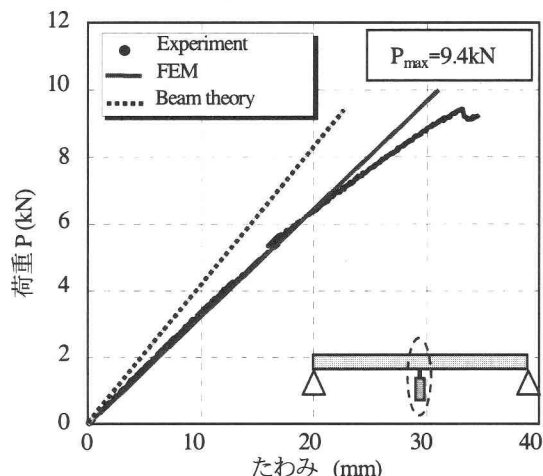


図-8 スパン中央での荷重-たわみ関係

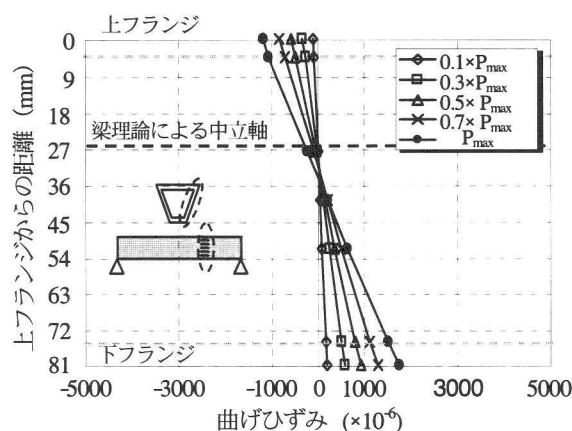


図-9 B 断面における曲げひずみ分布

3. 実験結果および考察

3.1 初期剛性, CFRP-コンクリートスラブの一体性について

CFRP-コンクリートハイブリッド桁の一体性、たわみ剛性を評価するため図-10 に示す 2 ケースの予備荷重実験を行った。なお、いずれのケースも鉛直荷重 P は $5(\text{kN})$ まで与えた。

桁スパン中央でのたわみ性状を図-11 に示す。また、曲げによる軸ひずみ分布性状を図-12 に示す。中央載荷時の荷重-たわみ曲線は、初等梁理論による関係とほぼ一致し、図-12 の曲げによる軸ひずみ分布からわかるように平面保持の仮定が成立することが分かる。すなわち、CFRP-コンクリートハイブリッド桁においても、鋼-コンクリート合成梁と同様な曲げ挙動を期待することができる。また、図-11(a)より、実験結果は初等梁理論による荷重-たわみ関係と整合し、せん断変形によるたわみは、CFRP 桁単独のそれと比較して、大きくないことが分かる。したがって、CFRP 桁のせん断変形によるたわみは、コンクリートスラブとの合成断面化によって低減可能と考えられる。一方、桁中央線から 10cm だけ載荷点を横にずらし、偏心載荷を行った結果、桁スパン中央での平均たわみが中央載荷時のたわみにほぼ一致し、CFRP 桁とコンクリートスラブとの一体性は十分確保されていると推測される。

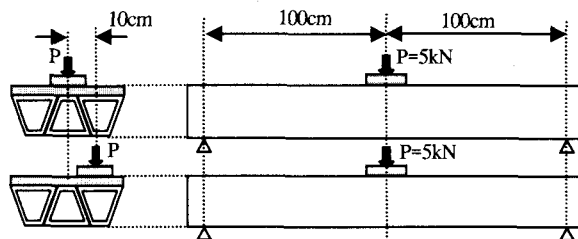
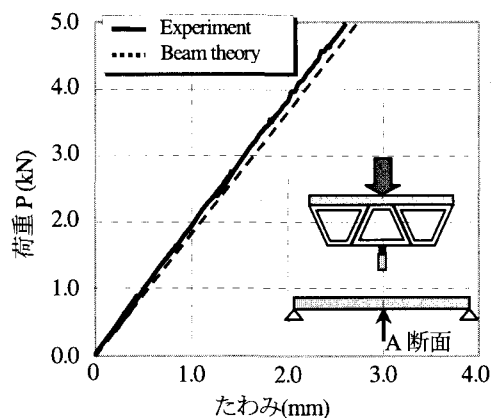
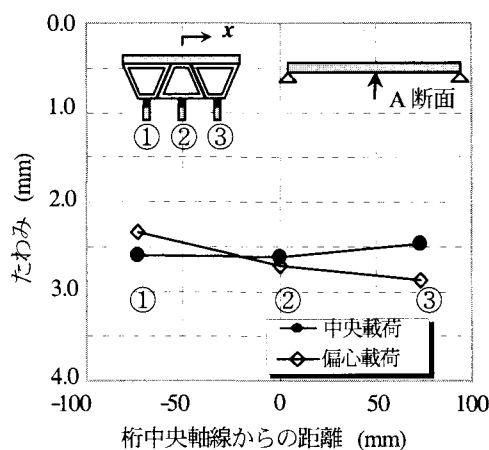


図-10 予備載荷時の荷重位置



(a) 中央載荷時の荷重-たわみ関係



(b) $P=5(kN)$ の中央・偏心載荷時のたわみ性状の比較
図-11 CFRP-コンクリートハイブリッド桁の変形状

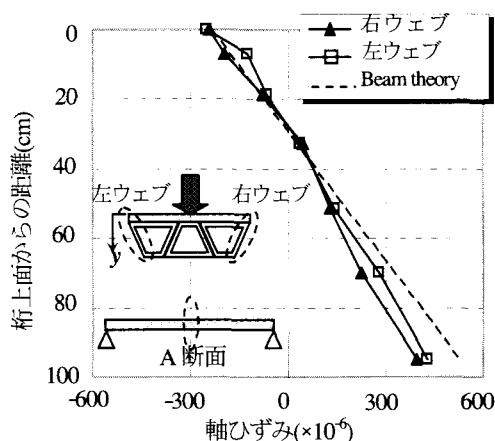


図-12 スパン中央断面における曲げひずみ分布性状

3.2 破壊性状について

CFRP-コンクリートハイブリッド桁の終局状態に至る荷重-たわみ曲線を図-13 に示す。なお、図中には、初等梁理論による線形関係、FEM による解析結果も示す。第1ピーク時におけるコンクリートとCFRP 桁間に発生するせん断応力を梁理論に基づき算定すると、 $1.07(N/mm^2)$ となり、接着剤のせん断付着強度 $19.6(N/mm^2)$ と比べると極めて小さい値に留まっている。ただし、初等梁理論では幅方向の厳密な分布性状まで考慮はできない。一方、第1ピークから第2ピークまでの接線剛性(約 $1.68 \times 10^8(kN/mm)$)は、コンクリートスラブとCFRP 桁の重ね梁構造と考えた時のたわみ剛性 $2.04 \times 10^8(kN/mm)$ に類似している。また、桁端部で観察されたコンクリートスラブとCFRP 桁の部材軸方向のずれから判断すると、CFRP 桁とコンクリートスラブの一体性は喪失したと考えるべきである。この一体性の喪失の原因は、CFRP 桁とコンクリートスラブの接着面に沿ったせん断によるずれ破壊のみでなく、例えば、この接着面に発生する垂直応力による引張剥離によっても生じると考えられる。そこで、FEM 解析によって、CFRP 桁とコンクリートスラブ間のせん断応力および剥離応力を詳細に算定したところ、それぞれ $7.23(N/mm^2)$ 、 $13.13(N/mm^2)$ であった。この FEM によるせん断応力は、接着剤のせん断付着強度を下回り、せん断によるずれ破壊の可能性は低いと考えるべきである。これに反して、接着剤の引張付着強度は $7.7(N/mm^2)$ であり、CFRP 桁とコンクリートスラブ間のずれの発生は、剥離応力によるものと考えられる。本研究で用いたアルミ製せん断キーには、スラブ止め効果は期待できないため、スラブの浮き上がり防止のため炭素繊維シートを2層巻き立てたが、効果は無かったと考えられる。

次に、スパン中央部での桁幅方向のたわみの分布性状、曲げひずみ分布をそれぞれ図-14、図-15 に示す。第1ピークまでは、ほぼ等しいたわみが発生しているが、最大荷重時(第2ピーク)においては、たわみが等しくなっていないことが分かる。コンクリートスラブが、CFRP 桁と剥離した結果、一体性ならびにコンクリートスラブによる荷重

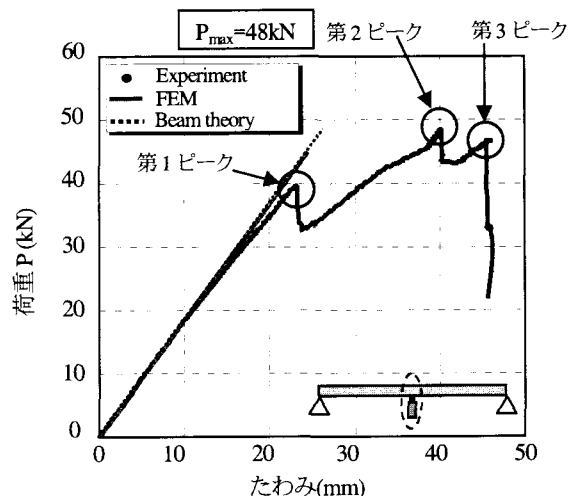


図-13 終局状態に至る荷重-たわみ関係

分配機能が喪失し、CFRP 桁間でのずれが発生したと考えられる。これは、スパン中央部での曲げによる軸ひずみの分布性状の変化から同様な結論が推察される。なお、桁端部でのずれ変位および終局時における桁全体のたわみ状況を図-16 に示す。試験終了後、巻き立てた炭素繊維シートを剥がし、CFRP 桁およびコンクリートスラブの破壊性状を観察した所、CFRP 桁の圧縮フランジおよびウェブの上縁部に座屈破壊が生じており、また CFRP 桁と巻き立てた炭素繊維シート間での剥離が顕著であった。

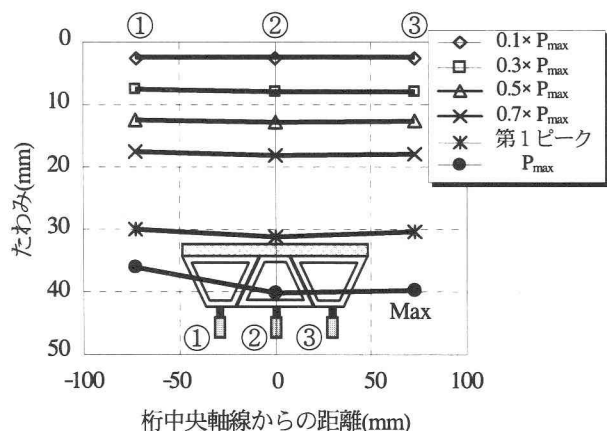


図-14 スパン中央部でのたわみ分布性状

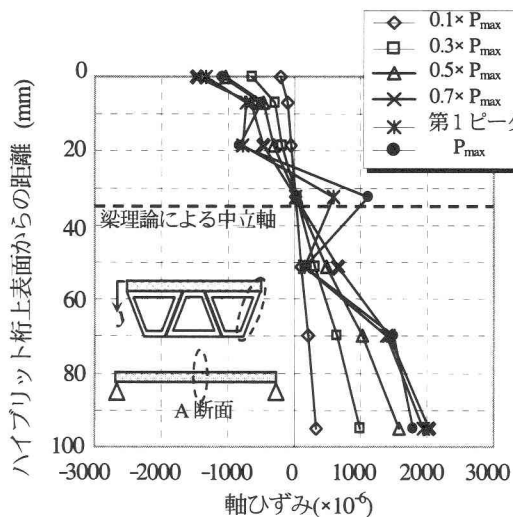
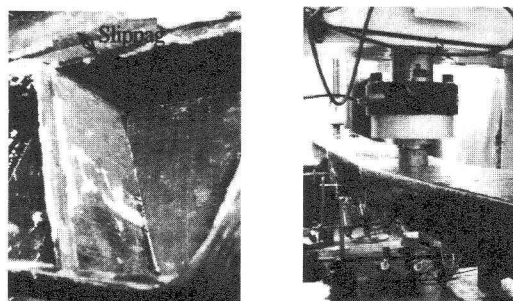


図-15 スパン中央部での曲げひずみ分布性状

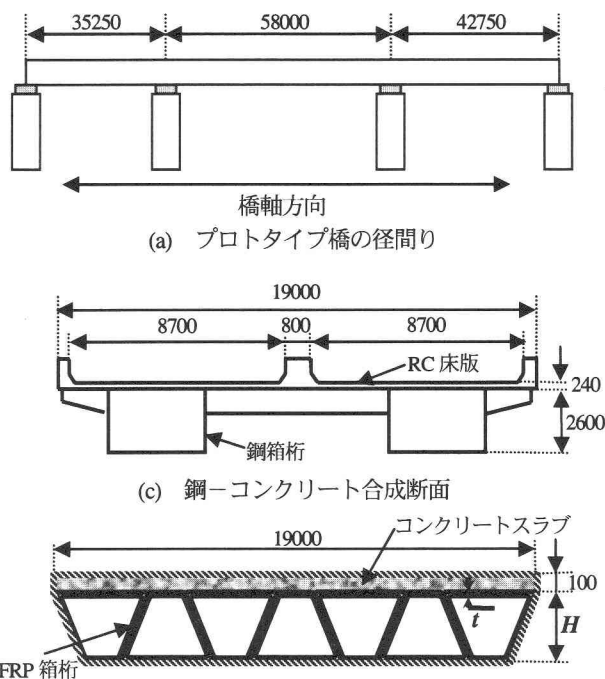


(a) 桁端部のずれ変位 (b) 終局時の変形状態
図-16 破壊の形態

4 有限要素解析による考察

4.1 解析モデル

CFRP-コンクリートハイブリッド桁構造に対して、終局時の判定に関しては精度上若干問題が残されているものの、終局時の非線形性はそれほど大きくなく、初期剛性を精度良く評価できる FEM 解析のモデルが構築できることが、これまでの成果から明らかである¹⁸⁾。ここでは、図-17 に示すような交差点に架かる 3 径間の実高架橋を対象として、CFRP-コンクリートハイブリッド桁構造の適用性について、桁高 H および板厚 t をパラメータとして B 活荷重に対してたわみ制限 ($L/500$, L : スパン長) を満足するかどうかを基本として検討した³¹⁾。なお、要素分割した解析モデルを図-18 に示す。CFRP 桁をシェル要素で、コンクリートスラブをソリッド要素でモデル化し、CFRP 桁とコンクリートスラブは、完全接着されているものと仮定し、炭素繊維シートの巻き立ては、モデル化していない。また、CFRP-コンクリートハイブリッド桁のコンクリートスラブ厚は、コンクリートスラブが CFRP 桁の上フランジにより支持さ



(c) CFRP-コンクリートハイブリッド桁の断面構成
図-17 解析対象のプロトタイプ橋梁 (寸法単位: mm)

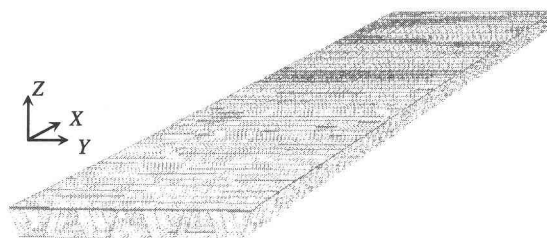


図-18 プロトタイプ橋上部構造の有限要素モデル

れているため、コンクリートスラブから CFRP 桁への荷重分配効果およびハイブリッド桁のたわみ剛性確保のための必要厚として設定した。

4.2 結果と考察

解析結果を図-19 に示す。たわみ制限を満足するには、CFRP の桁高 $H=1.5\sim 1.8(\text{m})$ の範囲では、CFRP の板厚は約 $8\sim 12\text{cm}$ 程度に収まる。 $H=1.6(\text{m})$ を例に、コンクリートスラブおよび CFRP 桁に発生する応力レベルの試算結果を表-3 に示す。CFRP 桁およびコンクリートスラブに発生する応力レベルは、限界状態に対して極めて低く (Wu-Tsai 損傷指標は 1 が破壊を意味する)、たわみ制限が設計を支配することが分かる。ただし、CFRP 桁およびコンクリートスラブ間の付着には十分な配慮が必要である。なお、Tsai-Wu の損傷指数の詳細については、文献[1,6,18]を参照していただきたい。また、表-4 には、単価の設定にも依存するが、本研究で設定した数値に基づく概略建設費の比較結果を示す。CFRP 桁の採用により、上部構造の重量を 25% に削減できることが分かる。CFRP 材料の実勢価格 $60\text{円}/\text{cm}^3$ では、100 年間維持管理費がかからないとしても、既存橋梁形式とはコスト的には競争できないことが明らかである。CFRP 材の価格が、現状の $1/4\sim 1/5$ となつて、はじめて競争対象となり得る結果であり、今後の材料コストの低減 (機械化大量生産などによる) ならびに構造詳細のより一層の合理化が望まれる。一方で、上部構造の軽量化による上部構造の架設コスト評価ならびに下部構造のコスト評価をより現実的なものとし、再検討を行うべきと考える。

4. 結論

本研究では、CFRP-コンクリートハイブリッド桁の小型モデルを製作し、曲げ載荷試験によりその変形性状ならびに破壊性状を検討した。汎用有限要素解析プログラム ABAQUS による詳細な応力伝達機構の検証も含め、その有効性について議論した。さらに、既存の鋼-コンクリート合成桁橋梁に準じた CFRP-コンクリートハイブリッド桁のプロトタイプを概略設計し、ABAQUS による応力照査・たわみ照査により、その経済性の概略比較を行った。以上より、CFRP-コンクリートハイブリッド桁の実用性を確認し、得られた結論をまとめると下記のとおりである。

- ① 構造の一体性を確保するためには、CFRP 桁とコンクリートスラブ間に十分な付着を確保することが重要で、特に、引き剥がしによる剥離に対して有効な構造詳細を検討する必要がある。
- ② CFRP 桁単体では、せん断変形による付加たわみを考慮しなければならない場合が多いが、コンクリートスラブとの合成化によって剛性が大きくなり、初等梁理論による初期剛性の評価が適用可能となる。
- ③ 現状の CFRP 材の材料価格では、既存の鋼材の代替材として採択するのは困難である。

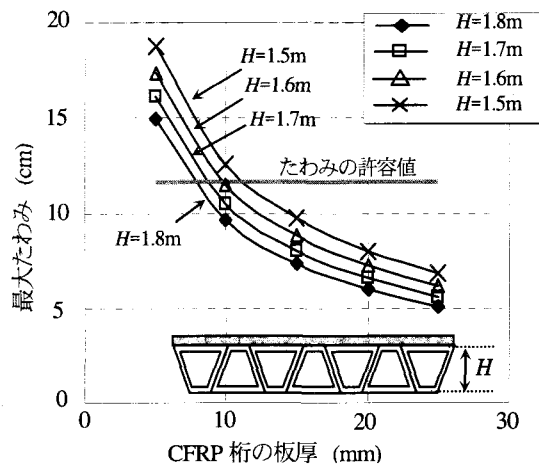


図-19 たわみと CFRP 部材寸法 (H , t) との関係

表-3 たわみ制限以外の試算結果の一例 ($H=1.6\text{m}$)

板厚 $t(\text{mm})$	5	10	15	20
最大たわみ (cm)	17.33 (1/335)	11.44 (1/507)	8.79 (1/660)	7.22 (1/803)
コンクリートの応力 (N/mm^2)	8.13	6.96	6.57	6.20
CFRP に対する Tsai-Wu の損傷指数	0.509	0.257	0.175	0.133
CFRP の体積 (m^3)	40.0	79.9	119.5	162.6

() 内は、スパン長に対する比

表-4 既存橋梁と提案する構造形式の概略経済性比較

比較項目	鋼-コンクリート (既設橋梁)	CFRP-コンクリート	
		*65 円/ cm^3	*20 円/ cm^3
桁高 (m)	2.6	1.6	1.6
上部工重量 (ton)	2776	732.6	732.6
材料費 (千円)	78,000	5,200,000	1,600,000
*2 上部工建設費 (千円)	546,000	144,000	144,000
*3 下部工建設費 (千円)	257,000	129,000	129,000
*4 維持管理費 (千円)	1,040,000	0	0
ライフサイクルコスト (千円)	1,921,000	5,473,000	1,873,000

*CFRP の概略価格

*2 上部工建設費は上部工の重量に比例すると仮定

*3 上部工重量が $1/4$ になると下部工建設費が $1/2$ になると仮定

*4 100 年間の維持管理費は、初期建設費の 1.3 倍かかると仮定

今後の検討課題としては、台形断面 CFRP 部材を貼り合わせるのみでは、十分なせん断耐力を確保するため、なんらかの機械的せん断キーを設けた断面形状を追求する必要がある。また、CFRP 桁とコンクリートスラブ間のずれ特性についても同様である。特に、付着せん断のみならずピーリングと呼ばれる引き剥がしに対する抵抗性能の改善についても検討が必要である。一方、FRP 材は、異物の衝突等による損傷に対して抵抗性の低い高分子材料でもあるの

で、金属材料の中で、軽量で、比強度の高いアルミ合金などとの合成構造も今後の検討対象となり得ると考えられる。

謝辞

本研究の実施には、科学研究費補助金・基盤研究(B)(2) (No. 15360239) の一部を用いた。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.9.
- 2) 宮入裕夫：サンドイッチ構造の基礎，日刊工業新聞社，1999.
- 3) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー88号，丸善，1996.9.
- 4) ICE Design and Practice Guide：FRP Composites Life Extension and Strengthening of Metallic Structures, Thomas Telford Publishing, 2001.
- 5) 三木光範，福田武人，元木信弥，北條正樹：複合材料，共立出版，1997.
- 6) 座古勝，松本金矢：複合材料の挙動解析，朝倉書店，pp.13-15，1998.3.
- 7) 建設省土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書（Ⅰ）—一次構造物材料としてのFRPの適用事例調査—，共同研究報告書210号，1998.
- 8) 建設省土木研究所：繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書（Ⅱ），共同研究報告書252号，2000.
- 9) Keller, Thomas：Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction, IABSE, Structural Engineering Documents 7, 2003.
- 10) 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.
- 11) 米丸啓介，藤崎忠志，杉崎健一，中辻照幸，鈴木弘之：CFRP パイプを構造材料に適用するための基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第542号，pp.195-202，2001.4.
- 12) 米丸啓介，藤崎忠志，杉崎健一，中辻照幸，鈴木弘之：CFRP トラス部材の引張特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第548号，pp.159-165，2001.10.
- 13) 米丸啓介，藤崎忠志，杉崎健一，中辻照幸，鈴木弘之：CFRP トラス部材の圧縮特性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第556号，pp.197-204，2002.6.
- 14) 山田聖志，小宮巖，中澤博之：連続引抜成形FRP 箱形断面部材の軸圧縮による崩壊性状，日本建築学会構造系論文集，第518号，pp.49-56，1999.4.
- 15) 山田聖志，中澤博之：連続引抜成形繊維補強ポリマー接合部の母材破壊性状，構造工学論文集，Vol.48A，日本建築学会，pp.11-18，2002.4.
- 16) 山田聖志，中澤博之，小宮巖：FRP 形材を骨組みとした膜構造のクランプ部破壊性状と光ファイバセンサによる内部損傷モニタリング，日本建築学会構造系論文集，第564号，pp.71-77，2003.2.
- 17) 小野紘一，杉浦邦征，大島義信，三木亮二，小牧秀之：角形断面を有する炭素繊維強化プラスチック管部材の強度特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.710/I-60，pp.449-459，2002.7.
- 18) 杉浦邦征，三木亮二，小野紘一，小牧秀之：炭素繊維強化複合材料からなる構造部材の強度特性に関する解析的検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.50A，pp.17-23，2004.3.
- 19) 小野紘一，杉浦邦征，北川淳一，小牧秀之，林誠：ブレード成形法によるH型CFRP 部材の圧縮・曲げ強度特性に関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp.105-113，2003.3.
- 20) 木嶋健，西崎到，明嵐政司：FRP 貼合せ部材の接着層せん断応力の評価，構造工学論文集，土木学会，Vol.49A，pp.11-18，2003.3.
- 21) 明嵐政司，西崎到：CFRP 吊橋の経済性に関する研究，土木技術資料42-8，2000.
- 22) 山田聖志，近田純生：FRP 剛接トラス歩道橋の振動特性，土木学会論文集，No.738/I-64，pp.67-74，2003.7.
- 23) 前田研一，北山信彦，中村一史，林耕四郎，梶川康男：GFRP 引き抜き成形材を用いた歩道橋の開発と使用性，構造工学論文集，土木学会，Vol.50A，pp.375-382，2004.3.
- 24) 北山暢彦，宇野名右衛門：「伊計平良川線ロードパーク連絡歩道橋」の設計・製作・架設，石川島播磨技報，橋梁特集号，pp.82-86，2001.9.
- 25) 張惟敦，鎌田敬治，佐伯彰一，山城和男：FRP 製歩道橋の主桁剛性および固有振動数に関する実験的評価，石川島播磨技報，第41巻，第3号，pp.105-109，2001.5.
- 26) 山本尚樹，張惟敦，佐伯彰一，山城和男：FRP 製歩道橋の主桁継手部に関する解析的評価，石川島播磨技報，第41巻，第3号，pp.110-113，2001.5.
- 27) 張惟敦，鎌田敬治，佐伯彰一，山城和男：FRP 製歩道橋の機械的接合部に関する実験的評価，石川島播磨技報，第41巻，第3号，pp.114-117，2001.5.
- 28) 例えば，Luke, S., Lee, C., Collins, S., Knudsen, E., Brown, P., Taljsten, B. and Olofsson, I.: Advanced Composite Bridge Decking System - Project ASSET, Structural Engineering International, Vol.12, No.2, pp.76-79, 2002.4.
- 29) Kitane, Y., Aref, Amjad J., and Lee, G.C.: Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure, Journal of Composites for Construction, Vol.8, No.2(March/April), pp.182-190, 2004.
- 30) Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: ABAQUS Theory Manual Ver.5.8, 1997.
- 31) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ 共通編，丸善，2002.3.

(2004年9月17日)