

(43) 引抜成形FRP桁の曲げ載荷実験とたわみ評価

梶原 淳生¹・中村 一史²・小林 拳祐³・花村 光一⁴・新倉 利之⁵

¹学生会員 東京都立大学 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
E-mail: kajihara-atsuki@ed.tmu.ac.jp

²正会員 東京都立大学 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)
hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 株式会社 IHI インフラ建設 橋梁事業部 鋼保全技術部
(〒135-8710 東京都江東区豊洲 3-1-1)
kobayashi0523@ihi-g.com

⁴正会員 株式会社栗本鐵工所 コンポジットプロジェクト室 技術部
(〒527-0108 滋賀県東近江市小八木町 1)
k_hanamura@kurimoto.co.jp

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社
(〒101-8462 東京都千代田区神田錦町)
toshiyuki.niikura@os.pacific.co.jp

鋼製アンダーデッキパネル工法における重量の増加に伴う課題に対して、軽量で施工性に優れる FRP からなる桁を RC 床版の下面から格子状に配置する補強工法の開発を行っている。FRP 桁には、引抜成形された炭素繊維、ガラス繊維からなる I 形断面の HFRP 桁、ガラス繊維からなるダブルウェブ GFRP 桁の適用を計画している。本研究では、FRP 桁による RC 床版の補強工法の実用化に向け、実物大の FRP 桁を対象に、3、4 点曲げの載荷試験を行って、曲げ耐力、破壊形式、たわみ等の曲げ特性を実験的に検討した。検討の結果、対象とした FRP 桁は設計荷重に対して十分な安全性を有することが確かめられた。また、材料物性値を等方性に換算して、等方性材料によるシェル要素およびはり理論を用いて鉛直変位を算定した結果、実験値を精度よく評価できることが確かめられた。

Key Words: hybrid FRP composite girder, double web GFRP girder, flexural characteristics, destructive form, deflection prediction

1. はじめに

我が国では、昭和 30 年に始まった高度成長期より昭和 40 年代後半をピークに多くの道路橋が整備された¹⁾。この時期の鉄筋コンクリート（以下、RC）床版は、現行基準の基礎となっている平成 8 年道路橋示方書²⁾で設計された RC 床版と比べて、疲労耐久性の劣る RC 床版であり、早期に修繕などの措置が必要なものの割合が増加している。このため、合理的かつ効果的な補強が急務となっている。このような経緯で道路橋床版に対する各種の補強工法が開発され、適用が進められてきた。

劣化した RC 床版の抜本的な対策は、RC 床版そのものを全面的に打ち換えることである。しかし、既に供用さ

れている道路橋での床版大規模更新では交通規制を伴い、社会的損失が大きくなることが懸念される。そこで、交通規制を伴わない、RC 床版下面からの補修・補強工法の開発³⁾が進められてきた。それらの工法として、縦桁増設工法、鋼板接着工法、炭素繊維接着工法等⁴⁾がある。これらは既設 RC 床版がある程度の残存強度・耐久性を保持していることが前提となっている。一方、既設 RC 床版の残存強度、耐久性に依存しない補強工法として、鋼製パネルを用いたアンダーデッキパネル工法⁵⁾が開発された。この工法は、補強効果が高いものの、重量の増加を伴うため、上部構造・下部構造の耐荷重に余裕がある橋梁であることが適用条件となる。

そこで、軽量で耐久性、耐食性にも優れる繊維強化プ

ラスチック (Fiber Reinforced Plastic, 以下, FRP) 製の桁を RC 床版の下面に設置する補強工法の開発⁹⁾を行っている。事前検討として、解析的にFRP桁を用いた補強工法の試設計が行われ、その有用性が示された。そこで、FRP 桁を用いた補強工法の実用化に向けた次の段階として、本研究では実物大 FRP 桁の曲げ載荷実験を行い、曲げ耐力、破壊形式を把握するとともに、より簡便な設計計算でFRP桁の曲げたわみ特性を推定するために、たわみ特性を解析的に検討した。

2. RC 床版補強のための FRP 桁の配置と試験体

(1) FRP 桁の格子配置と断面形状

FRP 桁を用いた RC 床版の補強工法の開発では、事前検討による解析的な試設計により、炭素繊維とガラス繊維からなるハイブリッド繊維強化プラスチック (Hybrid FRP, 以下, HFRP) 横桁, ガラス繊維強化プラスチック (Glass FRP, 以下, GFRP) 縦桁を組み合わせて, RC 床版下面に格子状に配置する形式とした。図-1 に, FRP 部材を格子状に配置した RC 床版の補強工法の概念図を示す。HFRP 横桁は, 主桁ウェブに設置した鋼製のブラケット・添接板を介して, 高力ボルトにより接合される。GFRP 縦桁は, HFRP 横桁の上に配置され, RC 床版が負担する荷重の一部を分担し, HFRP 横桁に荷重を伝達することを目的としている。これらの格子状に配置した FRP 桁が RC 床版と一体となって輪荷重に抵抗することで, 曲げ耐力だけではなく, せん断耐力の向上も図ることを想定している。

HFRP 横桁では, フランジに炭素繊維強化プラスチック (Carbon FRP, 以下, CFRP) と GFRP, ウェブに GFRP

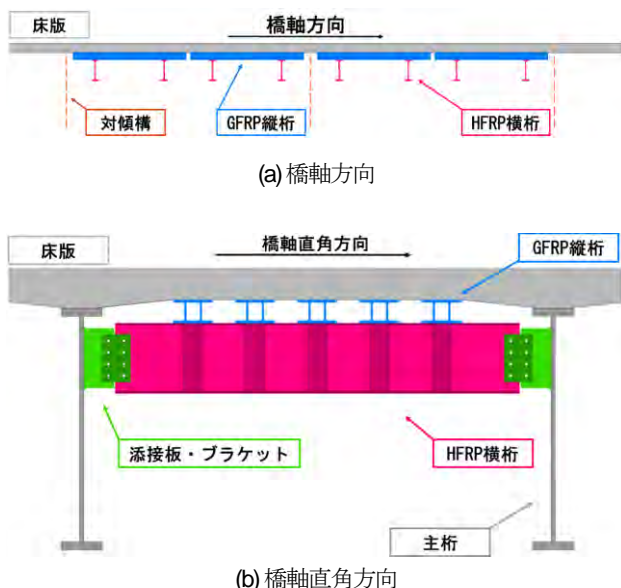


図-1 FRP 桁を格子状に配置した RC 床版の補強工法の概念図

を配置した構成である。図-2に示すように、桁高450mmのI形断面としている。また、GFRP 縦桁では、フランジ、ウェブともに GFRP で構成されており、図-3に示すように、桁高150mmのダブルウェブ形式のI形断面としている。ダブルウェブ形式を採用した理由は、RC 床版の荷重を桁の長手方向に安定して受けるため、また、補剛材を不要とするためである。

(2) FRP 桁試験体

FRP 桁の曲げ載荷実験を行うために、HFRP 横桁, GFRP 縦桁の実物大の試験体を用意した。HFRP 横桁,

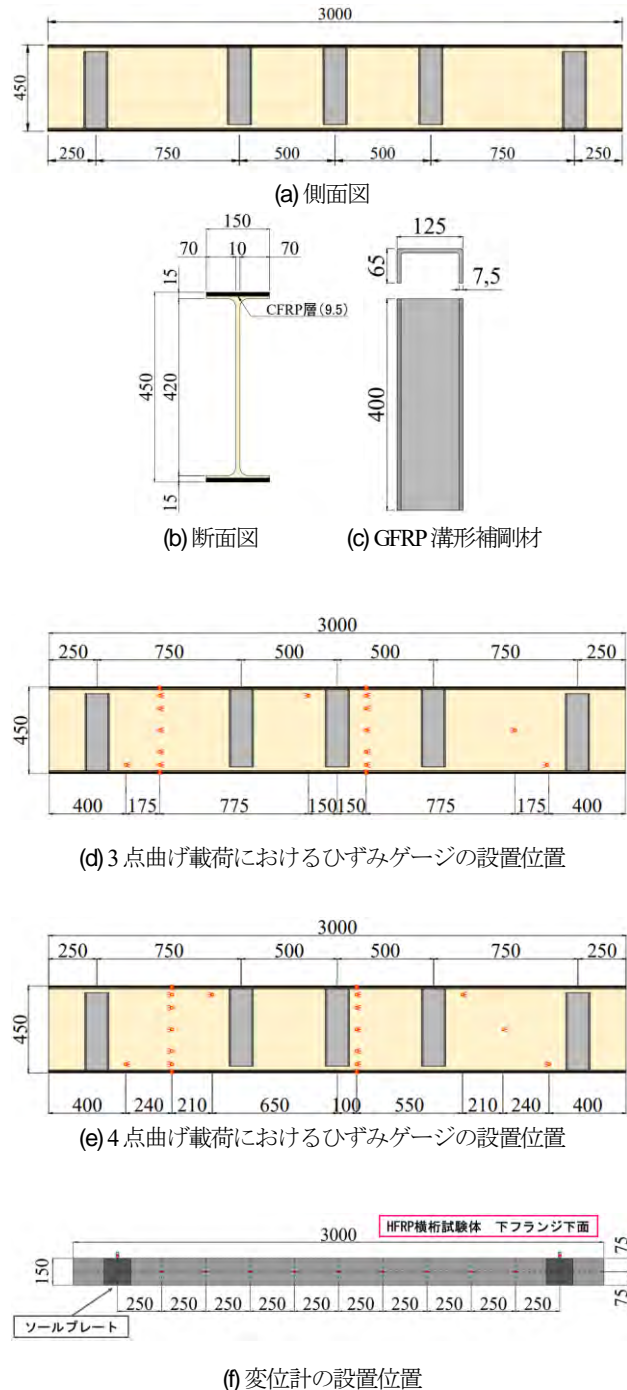


図-2 HFRP 横桁試験体の形状寸法, ひずみゲージ・変位計の設置位置

GFRP 縦桁とともに引抜成形によって製作されたものであり、試験体の形状寸法はそれぞれ図-2, 3 に示したとおりである。試験体の長さは、曲げ载荷実験の支点間距離 2500mm を考慮して、3000mm とした。HFRP 横桁のウェブには、载荷点、支点での集中荷重による座屈防止を目的として、GFRP 溝形補剛材を配置した。

表-1, 2 に、HFRP 横桁、GFRP 縦桁の材料物性値をそれぞれ示す。表のうち、太字については材料試験⁶⁻⁸⁾によって求めた値、その他については設計計画による値を示している。

3. 曲げ载荷実験の概要

(1) 载荷方法, セットアップ

FRP 桁の曲げ载荷実験について、支間中央に载荷する 3 点曲げ载荷に加え、支間中央部において純曲げを与える 4 点曲げ载荷を、HFRP 横桁、GFRP 縦桁に対してそれ

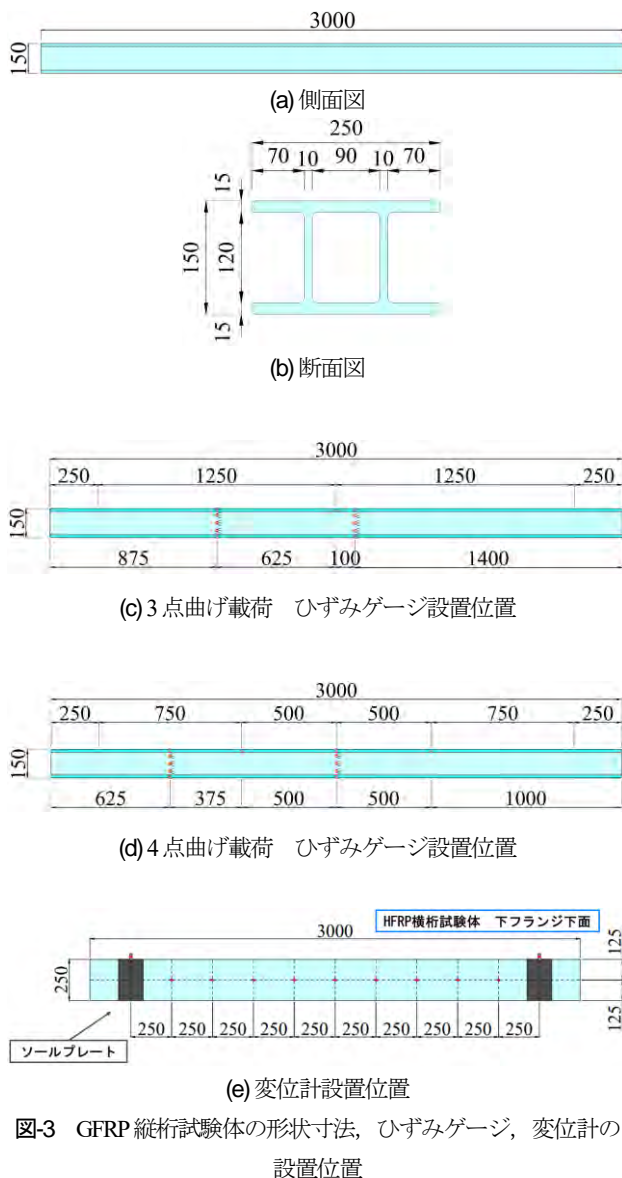


図-3 GFRP 縦桁試験体の形状寸法, ひずみゲージ, 変位計の設置位置

ぞれで実施した。一例として、図-4 に、HFRP 横桁の 4 点曲げ载荷のセットアップを示す。すべてのケースについて支間長は 2500mm とし、4 点曲げ载荷については载荷梁を用い、载荷スパン 1000mm とした。また、载荷は油圧ジャッキ (容量: 2000kN, 200mm) により行い、载荷方法は荷重を 50kN ずつ漸増した繰り返し载荷とし、50kN ごとのケースで载荷、除荷を 2 回ずつ、終局まで繰り返した。ただし、実験の都合上、HFRP 横桁の 4 点曲げ

表-1 HFRP 横桁試験体の材料物性値

材料物性値 材料	フランジ		ウェブ	溝形補剛材	
	CFRP	GFRP	GFRP	GFRP	
弾性係数 [kN/mm ²]	E_{11}	143.6	20.0	29.9	23.5
	E_{22}	12.0	20.0	23.8	10.0
	E_{33}	3.0	3.0	3.0	3.0
せん断 弾性係数 [kN/mm ²]	G_{12}	4.6	6.2	7.5	4.0
	G_{23}	4.0	4.0	4.0	4.0
	G_{31}	4.0	4.0	4.0	4.0
ポアソン 比	ν_{12}	0.30	0.30	0.20	0.30
	ν_{23}	0.05	0.05	0.05	0.05
	ν_{31}	0.05	0.05	0.05	0.05
引張強度[N/mm ²]	867.4		547.1	—	
圧縮強度[N/mm ²]	760.5		—	—	
せん断強度[N/mm ²]	—		138.8	—	

1: 長手方向, 2: 直角方向, 3: 厚さ方向
太字: 材料試験による実測値, その他: 計画値

表-2 GFRP 縦桁試験体の材料物性値

材料物性値 材料	フランジ	ウェブ	
	GFRP	GFRP	
弾性係数 [kN/mm ²]	E_{11}	36.6	28.0
	E_{22}	15.3	21.6
	E_{33}	3.0	3.0
せん断 弾性係数 [kN/mm ²]	G_{12}	4.7	7.1
	G_{23}	4.0	4.0
	G_{31}	4.0	4.0
ポアソン 比	ν_{12}	0.27	0.30
	ν_{23}	0.05	0.05
	ν_{31}	0.05	0.05
引張強度[N/mm ²]	860.0	539.6	
圧縮強度[N/mm ²]	669.6	552.5	
せん断強度[N/mm ²]	—	135.6	

1: 長手方向, 2: 直角方向, 3: 厚さ方向
太字: 材料試験による実測値, その他: 計画値

表-3 漸増繰り返し载荷の条件

载荷ケース (kN)	HFRP 横桁		GFRP 縦桁	
	3 点曲げ	4 点曲げ	3 点曲げ	4 点曲げ
0⇔50	2 回	2 回	2 回	2 回
+50kN ごと	⋮	⋮	⋮	⋮
0⇔300	⋮	⋮	2 回	⋮
0⇔350	⋮	⋮	最大 343kN	2 回
0⇔400	⋮	⋮	—	最大 391kN
+50kN ごと	2 回	⋮	—	—
0⇔550	最大 548kN	⋮	—	—
+50kN ごと	—	⋮	—	—
0⇔750	—	2 回	—	—
0⇔終局	—	最大 855kN	—	—

荷荷については 0→750kN 荷荷 2 回目の後、耐荷力を求めるために終局まで荷荷した (表-3)。

(2) ひずみゲージ・変位計の設置位置と着目点

垂直ひずみ、最大せん断ひずみを求めるため、FRP 桁のフランジ、ウェブに 1 軸ゲージ、3 軸ゲージ (ゲージ長 3mm) を設置した。ひずみゲージの設置位置については、図-2、3 に示したとおりであり、着目点は主に支間中央断面付近、荷荷点-支間中央断面付近とした。また、鉛直変位を求めるため、FRP 桁の下フランジ下面に変位計 (容量：100mm、25mm) を設置した。変位計の設置位置は、図-2、3 に示したとおりであり、着目点は下フランジ下面、幅方向中央とし、長手方向に 250mm 間隔で計測を行った。

(3) FEM 解析によるモデル化

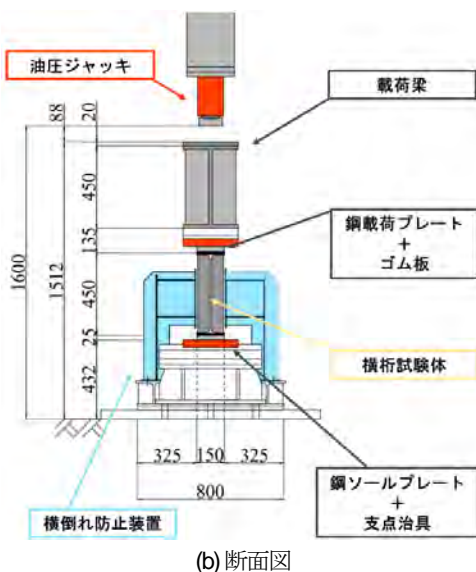
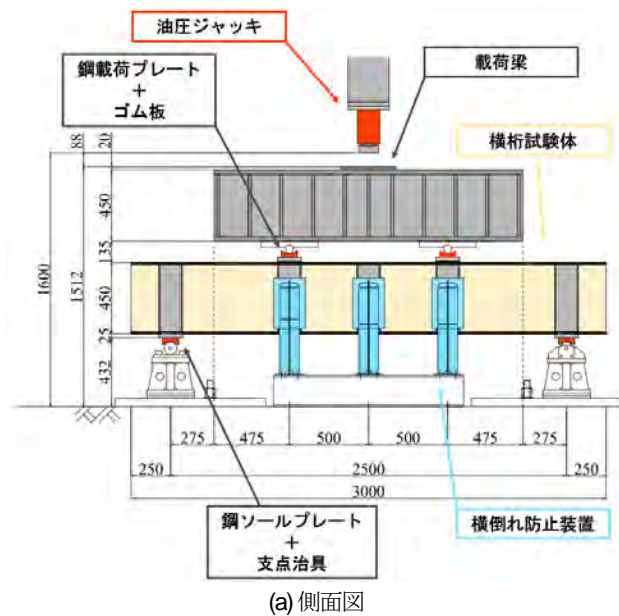
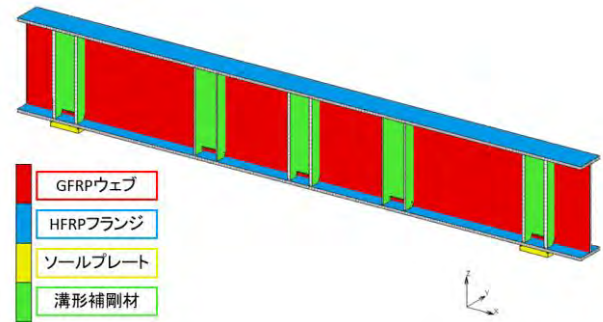
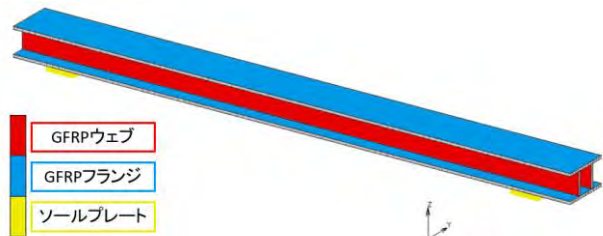


図-4 HFRP 横桁 4 点曲げ荷荷のセットアップ

曲げ荷荷実験で計測された垂直ひずみ、最大せん断ひずみ、たわみの実験値に対して、解析的な推定を行う上で、モデル化の妥当性を検証するため、汎用有限要素解析プログラム MSC. Marc/Mentat2021 を用いた FEM 解析を行った。解析モデルは弾性モデルとし、要素サイズ 5×5mm のシェル要素を基本として、試験体の公称寸法を用いて作成した (図-5)。



(a) HFRP 横桁試験体



(b) GFRP 縦桁試験体

図-5 FRP 桁の解析モデル図

表-4 HFRP 横桁試験体の解析モデルに用いた材料物性値

解析モデルの 材料物性値	HFRP 横桁		溝形補剛材		
	フランジ	ウェブ	補強あり	補強なし	
弾性係数 [kN/mm ²]	E_{11}	98.3	29.9	119.9	23.5
	E_{22}	14.9	23.8	113.6	10.0
	E_{33}	3.0	3.0	110.3	3.0
せん断 弾性係数 [kN/mm ²]	G_{12}	4.6	7.5	43.8	4.0
	G_{23}	4.0	4.0	43.8	4.0
	G_{31}	4.0	4.0	43.8	4.0
ポアソン比	ν_{12}	0.30	0.20	0.30	0.30
	ν_{23}	0.05	0.05	0.18	0.05
	ν_{31}	0.05	0.05	0.18	0.05

1：長手方向，2：直角方向，3：厚さ方向

表-5 GFRP 縦桁試験体の解析モデルに用いた材料物性値

解析モデルの 材料物性値	GFRP 縦桁		ソール プレート	
	フランジ	ウェブ		
弾性係数 [kN/mm ²]	E_{11}	36.6	28.0	205.0
	E_{22}	15.3	21.6	
	E_{33}	3.0	3.0	
せん断 弾性係数 [kN/mm ²]	G_{12}	4.7	7.1	-
	G_{23}	4.0	4.0	
	G_{31}	4.0	4.0	
ポアソン比	ν_{12}	0.27	0.30	0.3
	ν_{23}	0.05	0.05	
	ν_{31}	0.05	0.05	

1：長手方向，2：直角方向，3：厚さ方向

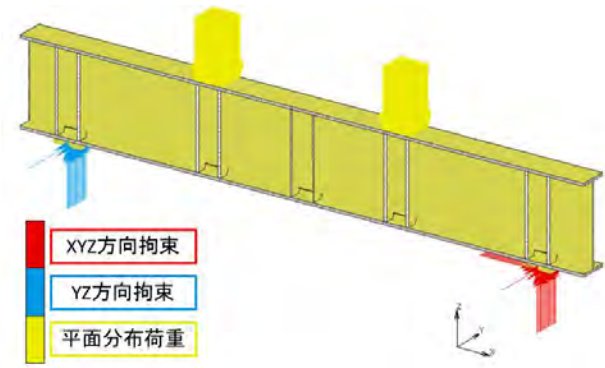


図-6 解析モデルの境界条件

表-4, 5 に、解析に用いた材料物性値を示す。FRP 桁はどちらも異方性材料としてモデル化した。また、HFRP 横桁フランジの材料物性値は、表-1 に示したフランジのCFRP層、GFRP層の材料物性値を各層厚（9.5mm, 5.5mm）の比率で換算して算定した。

支持条件は、実験と同様に単純支持とした。また、载荷条件は、実験では载荷板、ゴム板を介して载荷するが、解析ではこれらを省略し、上フランジ载荷位置に平面分布荷重によって荷重を与えた。载荷方法は荷重制御で1000kNまで载荷した（図-6）。

(4) たわみの理論値

曲げ载荷実験における鉛直変位の理論値は、せん断変形による付加たわみを考慮した Timoshenko 梁理論⁹⁾に基づき、式(1)を用いて評価した。

$$\begin{cases} v(x) = -\frac{P}{12E_b I_c} x\{x^2 + 3a(a-L)\} + \frac{P}{2G_b A} x & 0 \leq x \leq a \\ v(x) = -\frac{P}{12E_b I_c} a\{a^2 + 3x(x-L)\} + \frac{P}{2G_b A} a & a \leq x \leq L-a \\ v(x) = -\frac{P}{12E_b I_c} (L-x)\{(L-x)^2 + 3a(a-L)\} \\ \quad + \frac{P}{2G_b A} (L-x) & L-a \leq x \leq L \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 x は支点からの長手方向位置、 $v(x)$ は x における鉛直変位、 P は荷重、 L は支間長、 a は支点から载荷位置までの距離、 E_b はI形断面の換算軸方向弾性係数、 I_c はフランジ、ウェブの弾性係数を考慮した合成断面としての2次モーメント、 G_b はI形断面の換算せん断弾性係数、 A はI桁断面の断面積である。

通常、右辺第2項のせん断剛性 $G_b A$ は、せん断補正係数 k で補正した式(2)で与えられる。

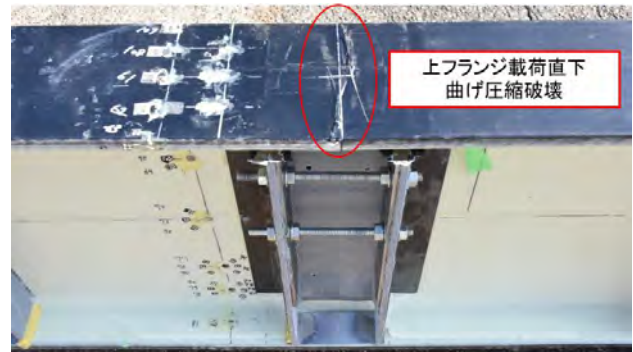
$$G_b A = kGA \quad (2)$$

ここに、 G は基本としたせん断弾性係数である。厳密には、複合断面に対するせん断補正係数を算出する必要があるが¹⁰⁾、本研究ではせん断補正係数 k は全断面積 A に対するウェブの断面積 A_w の比 (A_w/A) で与えられる概算値を用いることとし、基本としたせん断弾性係数には、せん断変形に支配的とされるウェブのせん断弾性係数を採用することとした¹¹⁾。

4. 実験結果と考察

(1) 曲げ耐力と破壊形式

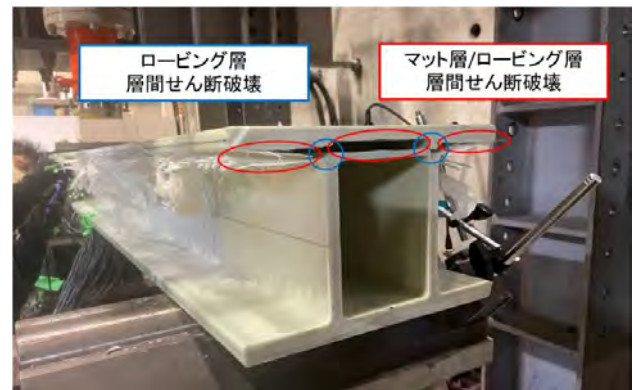
図-7に、HFRP横桁、GFRP縦桁の3, 4点曲げ载荷による破壊の状況を示す。曲げ载荷実験より、HFRP横桁の最大荷重は、3点曲げ载荷で548kN、4点曲げ载荷で845kNとなり、脆性的かつ瞬間的に破壊した。破壊形式



(a) HFRP 横桁 (3点曲げ载荷)



(b) HFRP 横桁 (4点曲げ载荷)



(c) GFRP 縦桁 (3点曲げ载荷)



(d) GFRP 縦桁 (4点曲げ载荷)

図-7 FRP 桁の曲げ破壊の状況

は、3点曲げ載荷で上フランジ載荷直下での曲げ圧縮破壊、4点曲げ載荷で上フランジ載荷直下の曲げ圧縮破壊とフランジ CFRP 層/GFRP 層間の層間せん断破壊の複合破壊とみられた。

一方、GFRP 縦桁の最大荷重は、3点曲げ載荷で 343kN、4点曲げ載荷で 391kN となり、HFRP 横桁と同様に、脆性的かつ瞬間的に破壊した。破壊形式は、3点曲げ載荷で上フランジにおけるマット層/ロービング層間およびロービング層内での層間せん断破壊、4点曲げ載荷で上フランジ、ウェブにおけるマット層/ロービング層間の層間せん断破壊とみられた。

ここで、FRP 桁を用いた床版補強工法に対する設計荷重は、輪荷重 100kN に衝撃係数 0.4 を考慮した 140kN であり、FRP 桁はその荷重を RC 床版と分担して負担する。したがって、両 FRP 桁は設計荷重に対して満足する耐力力を保持し、十分な安全性を有するといえた。

(2) 曲げ変形特性

下フランジ下面に設置した変位計を用いて、鉛直変位

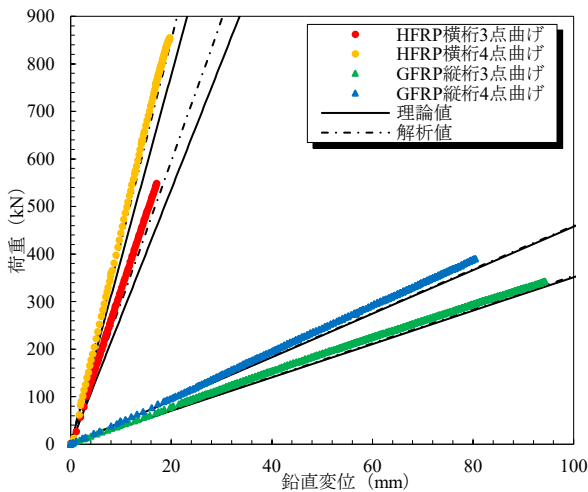


図-8 荷重—変位関係 (支間中央部)

を求めた。図-8に終局まで載荷した際の支間中央における荷重—変位関係を示す。また、図-9に終局まで載荷した際の 100kN 時における鉛直変位分布を示す。

これらの結果より、すべての載荷ケースについて、荷重—変位関係はほぼ線形挙動を示すことが確認された。また、鉛直変位分布は理論値、解析値、実験値の順番に大きくなり、過去の FRP 桁の実験¹¹⁾¹²⁾と類似の傾向が見られた。

(3) 垂直ひずみ分布とせん断ひずみ分布

フランジ、ウェブに設置したひずみゲージを用いて、垂直ひずみ分布、最大せん断ひずみ分布を求めた。終局まで載荷した際の 100kN 時における、支間中央付近の断面の垂直ひずみ分布、最大せん断ひずみ分布を図-10、図-11にそれぞれ示す。

これらの結果より、垂直ひずみ分布、最大せん断ひずみは、解析より小さい値で、概ね同様の分布を示すことが確認された。また、垂直ひずみ分布より、FRP 桁は平面保持性を有することがわかった。

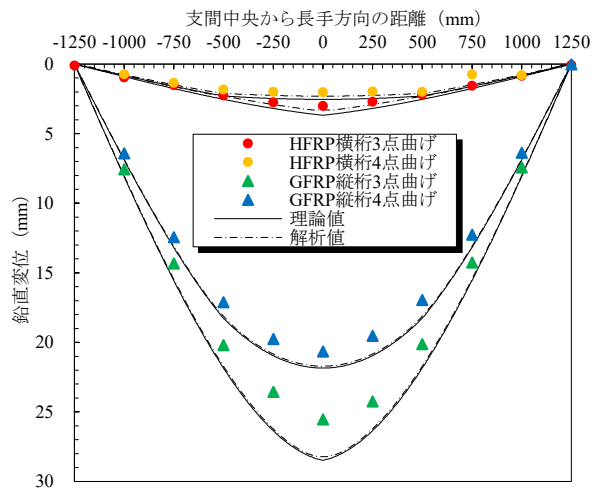


図-9 100kN 載荷時の鉛直変位分布

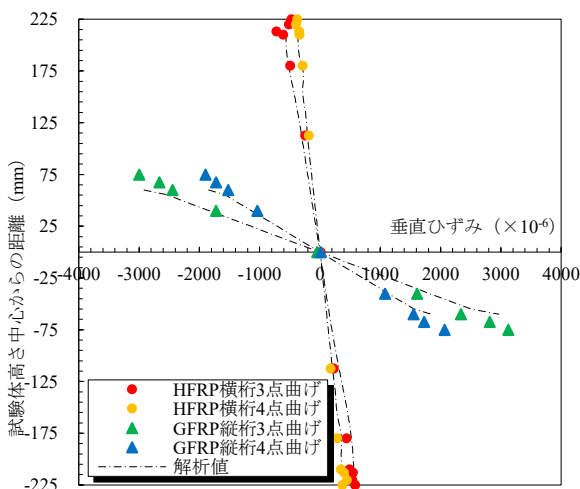


図-10 100kN 載荷時の垂直ひずみ分布

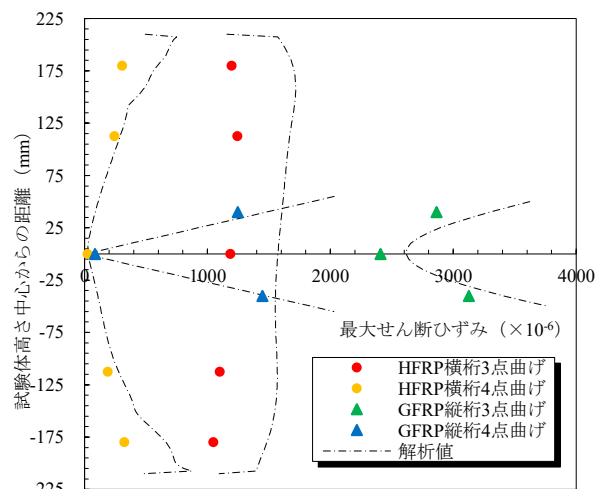


図-11 100kN 載荷時の最大せん断ひずみ分布

5. せん断変形を考慮した FRP 桁のたわみ同定

(1) Timoshenko の梁理論に基づくたわみの同定方法

Timoshenko 梁理論に基づき、各载荷位置における荷重一変位関係の傾き（たわみ剛性）を用いて、せん断剛性を実験的に同定し、より精緻なたわみ計算方法を検討した¹¹⁾。

式(1)より、支間中央における鉛直変位 v_c は式(3)で求められる。

$$v_c = -\frac{PL^2a}{48E_bI_c} \left(3 - 4\frac{a^2}{L^2}\right) + \frac{P}{2G_bA}a \quad (3)$$

式(3)について、荷重と鉛直変位を増分形に表示して変形すると、式(4)が得られる。

$$\frac{\Delta v_c}{\Delta P} = -\frac{a^3}{12E_bI_c} + \left(\frac{L^2}{16E_bI} + \frac{l}{2G_bA}\right)a \quad (4)$$

式(4)は、支点から载荷位置までの距離 a の3次関数で与えられることから、たわみ剛性の逆数 $\Delta v_c/\Delta P$ の値を曲げ载荷実験により求め、最小2乗法によるカーブフィットから曲げ剛性 E_bI_c とせん断剛性 G_bA （せん断補正係数 k ）の値を同定することができる¹¹⁾。

(2) せん断補正係数、たわみの同定結果

図-12 に、たわみ剛性の逆数 $\Delta v_c/\Delta P$ と支点から载荷位置までの距離 a の関係をプロットし、最小2乗法でカーブフィットしたものを示す。ここで、GFRP 縦桁に関しては、载荷スパン 500mm, 1500mm の4点曲げ载荷を行い、 $a=500\text{mm}$, 1000mm に対する $\Delta v_c/\Delta P$ を追加した。

これらの結果より、HFRP 横桁、GFRP 縦桁の換算軸方向弾性係数 E_b 、換算せん断弾性係数 G_b 、曲げ剛性 E_bI_c 、せん断剛性 G_bA は表-6 のように同定された。ここで、表-6 より、理論計算のために導出した曲げ剛性（同定前）は、実験による同定値（同定後）と比較してその差は小さいこと、せん断剛性についてはその差が大きいことがわかる。

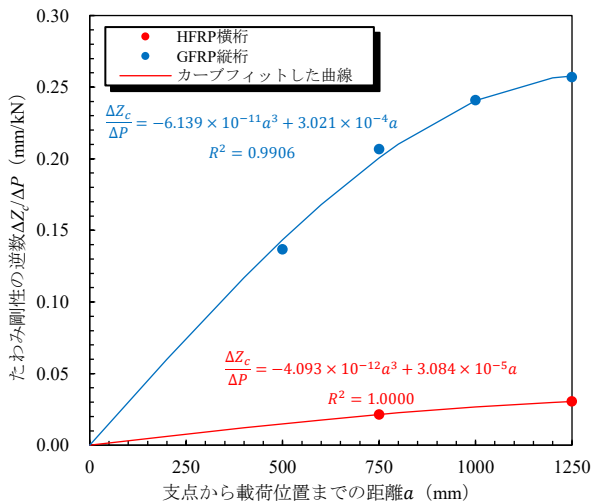


図-12 たわみ剛性の逆数—支点から载荷位置までの距離の関係

そこで、同定後の曲げ剛性、せん断剛性、換算後の弾性係数を用いて、式(1)による理論値、FEM による解析値を比較する。図-13 に、100kN 载荷時の鉛直変位分布を示す。図-9 と比較して、同定後の値を用いれば、FRP 桁の鉛直変位分布を精度よく評価できることがわかる。

6. 等方性部材と仮定した時の FRP 桁のたわみ評価

(1) 等方性部材と仮定した時のたわみの同定方法

構造解析プログラムには、異方性の材料物性値を扱うことができないものも存在する。FRP 桁を等方性部材として扱う場合、たわみの評価に支配的な長手方向の弾性係数とせん断弾性係数の関係は、等方性材料として許容される範囲を超え、適切なたわみを算定することができない。そこで、FRP 桁を等方性部材と仮定して、たわみを評価する場合、材料物性値の換算方法を検討した。

理論上、式(1)より、断面形状、曲げ剛性 E_bI_c 、せん断剛性 G_bA が同値であれば、鉛直変位 $v(x)$ は同じになる。

等方性と仮定して、材料物性値の換算方法を、HFRP 横桁を例として示す。まず、等方性と仮定したときのウェブのせん断弾性係数を G_{Cwl} とし、せん断剛性が同一であれば、 G_{Cwl} は式(5)より、 $G_{Cwl}=7.5\text{kN/mm}^2$ とおける。

表-6 同定後の曲げ剛性、せん断剛性、せん断補正係数

桁の種類	HFRP 桁			GFRP 桁		
	同定前	同定後	誤差 (%)	同定前	同定後	誤差 (%)
換算軸方向弾性係数 E_b (kN/mm ²)	82.9	87.9	5.9	35.9	37.1	3.5
換算せん断弾性係数 G_b (kN/mm ²)	3.6	4.9	36.2	1.7	3.5	104.7
せん断補正係数 k	0.48	0.66	36.2	0.24	0.50	104.7
曲げ剛性 E_bI ($\times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^2$)	19.2	20.4	5.9	1.3	1.4	3.5
せん断剛性 G_bA ($\times 10^3 \text{kN}$)	31.5	42.9	36.2	17.0	34.9	104.7

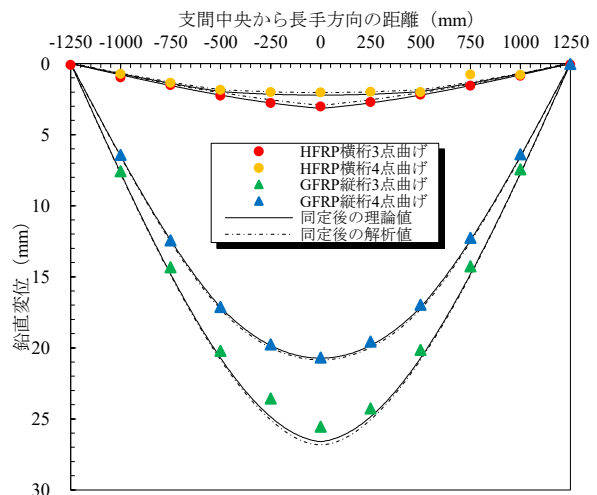


図-13 せん断剛性同定後の载荷 100kN 時の鉛直変位分布

$$\begin{aligned} kG_{Cwl}A &= G_bA \\ G_{Cwl} &= G_b/k \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、等方性材料では、弾性係数 E 、せん断弾性係数 G 、ポアソン比 ν は式(6)の関係で表される。

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (0 \leq \nu \leq 0.5) \quad (6)$$

したがって、等方性と換算したときのウェブの弾性係数 E_{Cwl} をとすると、 E_{Cwl} は式(7)となり、 $15.0 \text{ kN/mm}^2 \leq E_{Cwl} \leq 22.5 \text{ kN/mm}^2$ となる。

$$2G_{Cwl} \leq E_{Cwl} \leq 3G_{Cwl} \quad (7)$$

そこで、仮に $E_{Cwl} = 20.0 \text{ kN/mm}^2$ とする。また、曲げ剛性 $E_b I_c$ は式(8)により求められる。

$$E_b I_c = \frac{E_f I_c^2}{I_o} = \frac{E_f \left(\frac{b_f t_f^3}{12} \times 2 + A_f Z_f^2 \times 2 + \frac{E_w t_w h_w^3}{E_f 12} \right)^2}{\left(\frac{b_f t_f^3}{12} \times 2 + A_f Z_f^2 \times 2 + \frac{t_w h_w^3}{12} \right)} \quad (8)$$

表-7 等方性に換算した FRP 桁解析モデルの材料物性値

解析モデルの材料物性値	HFRP 横桁		GFRP 縦桁	
	フランジ	ウェブ	フランジ	ウェブ
弾性係数 [kN/mm ²]	111.7	20.0	39.9	18.0
せん断弾性係数 [kN/mm ²]	55.3	7.5	19.7	7.1
ポアソン比	0.01	0.33	0.01	0.27

表-8 100kN 載荷時の FRP 桁の支間中央部の鉛直変位

支間中央部の鉛直変位	HFRP 横桁		GFRP 縦桁	
	3点曲げ	4点曲げ	3点曲げ	4点曲げ
実験値 (mm)	3.03	2.03	25.55	20.67
解析値(等方性) (mm)	2.99	2.09	25.83	19.97
実験値との誤差 (%)	-1.17	2.71	1.07	-3.43
解析値(異方性) (mm)	2.87	2.04	26.81	20.85
実験値との誤差 (%)	-5.25	0.52	4.93	0.85

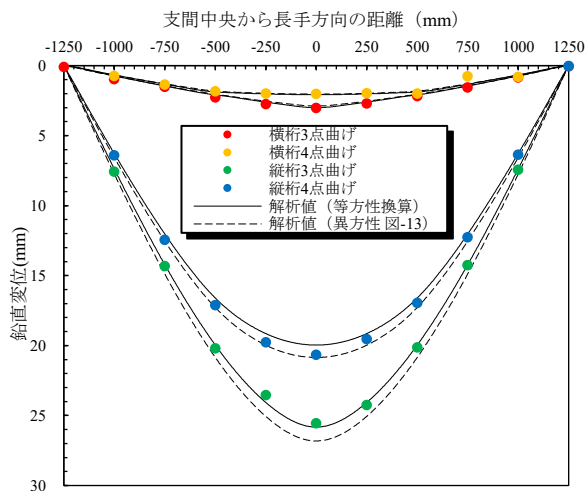


図-14 等方性に換算した材料物性値を用いた時の 100kN 載荷時の鉛直変位分布

ここに、 I_o は断面 2 次モーメント、 b_f はフランジ幅、 t_f はフランジ厚さ、 A_f はフランジ断面積、 Z_f は中立軸からフランジ図心までの距離、 E_f はフランジ軸方向弾性係数、 t_w はウェブ厚さ、 h_w はウェブ高さ、 E_w はウェブの軸方向弾性係数である。

よって、等方性と換算したときのフランジの弾性係数 E_{Cfl} をとし、式(8)の E_f に E_{Cfl} 、 E_w に E_{Cwl} を代入すると、 $E_{Cfl} = 111.7 \text{ kN/mm}^2$ と算定される。

同様に GFRP 縦桁についても、等方性と換算した時のフランジの弾性係数 E_{Sfl} 、ウェブの弾性係数 E_{Swl} 、ウェブのせん断弾性係数 G_{Swl} を求めると、 $E_{Sfl} = 39.9 \text{ kN/mm}^2$ 、 $E_{Swl} = 18.0 \text{ kN/mm}^2$ 、 $G_{Swl} = 7.1 \text{ kN/mm}^2$ となる。

また、フランジのせん断弾性係数は、式(1)より、たわみを計算する際には任意となる。フランジのせん断弾性係数の差異がたわみの評価に及ぼす影響は小さいと考えられることから、両桁ともにフランジのポアソン比を 0.01 として式(6)により算定した。

以上より、FRP 桁の材料物性値を等方性に換算した材料物性値を表-7 に示す。

(2) 等方性部材と仮定した時のたわみの評価

表-7 の等方性に換算した材料物性値を図-5 の解析モデル(等方性シェル要素)に適用して、100kN 載荷時の鉛直変位分布を求めた。それらの結果を図-14 に示す。また、表-8 に支間中央部の鉛直変位を示す。

これらの結果より、材料物性値を等方性に換算して、解析を行った場合においても、実験値と比較して、精度よくたわみの評価をすることができることがわかる。支間中央部の鉛直変位について、実験値との最大誤差は、GFRP 縦桁の 4 点曲げ載荷において -3.43% であった。また、等方性の材料物性値の解析結果は、異方性の解析結果(図-13)と比較して、HFRP 横桁ではたわみが大きく、GFRP 縦桁ではたわみが小さく評価される傾向にあることがわかった。

7. まとめ

本研究では、RC 床版補強工法に用いる実物大の HFRP 横桁、GFRP 縦桁を対象に、3 点曲げ載荷、4 点曲げ載荷を行って、曲げ耐荷力、たわみ等の曲げ変形特性を実験的に検討した。さらに、FRP 桁の材料物性値をたわみ評価のために等方性に置き換えることで、簡便なたわみの評価を試みた。それらの結果、以下のことがいえた。

- (1) HFRP 横桁、GFRP 縦桁の曲げ耐荷力は、設計荷重に対して十分な安全性を有することが確かめられた。
- (2) HFRP 横桁の曲げ破壊形式は、3 点曲げ載荷では上フランジ載荷直下の曲げ圧縮破壊、4 点曲げ載荷では

上フランジ載荷直下の曲げ圧縮破壊とフランジCFRP層/GFRP層間の層間せん断破壊の複合破壊であった。

- (3) GFRP縦桁の曲げ破壊形式は、3点曲げ載荷では上フランジのマット層/ロービング層間およびロービング層内の層間せん断破壊、4点曲げ載荷では上フランジ、ウェブでのマット層/ロービング層間の層間せん断破壊であった。
- (4) HFRP横桁、GFRP縦桁のたわみ特性について、支間中央部の鉛直変位は終局までほぼ線形挙動を示すこと、鉛直変位分布はTimoshenko梁理論、FEM解析によれば安全側に評価されることが確かめられた。
- (5) HFRP横桁、GFRP縦桁の垂直ひずみ分布、最大せん断ひずみ分布からは、平面保持性を示すこと、またFEMによる解析値は実験値より大きく評価されるものの、実験値と同様の分布を示すことがわかった。
- (6) 曲げ剛性、せん断剛性を実験的に同定して、Timoshenko梁理論により鉛直変位を評価した結果、実験値を精度よく推定することができた。
- (7) 材料物性値を等方性に換算して、等方性材料によるシェル要素を用いて鉛直変位を算定した結果、実験値を精度よく評価できることが確かめられた。

謝辞：本研究は、株式会社 IHI インフラ建設、株式会社 栗本鐵工所、パンフィックコンサルタンツ株式会社、東京都立大学による共同研究として実施された。検討にあたり、松井繁之大阪大学名誉教授には、貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理，森北出版，

2007.

- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I・II）（1996改），1996.
- 3) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000.
- 4) 株式会社 IHI インフラ建設：IS パネル（コンクリート床版補強工法）技術紹介，https://www.ihico.jp/ik/technology/under_deck_panel/index.html，2023年8月25日閲覧確認.
- 5) 小野寺諒，中村一史，小林拳祐，花村光一，新倉利之：鋼板接着で補強された GFRP 板の高力ボルト継手に関する引張試験，土木学会論文集，Vo.79, No.14, 22-14006, 2023.
- 6) 日本規格協会：JISK 7164，引張特性の試験方法—第4部：等方性及び直行異方性強化繊維プラスチックの試験条件，2005.
- 7) 日本規格協会：JIS K 7019，±45°引張試験による面内せん断特性の求め方，1999.
- 8) 日本規格協会：JIS K 7018，積層板の面内圧縮特性の求め方，1999.
- 9) Cowper, G.R. : The shear coefficient Timoshenko's beam theory, ASME Journal of Applied Mechanics, 33, pp.35-340, 1966.
- 10) Bank, L.C. : Shear coefficients for thin-walled composite beams , Composite Structures, 8, pp.47-61, 1990.
- 11) 中村一史，前田研一，睦好宏史，鈴木研二：ハイブリッド FRP 桁のせん断変形特性とウェブ・クリッピングに関する実験的検討，第7回複合構造の活用に関するシンポジウム，2007.
- 12) 北山暢彦，前田研一，中村一史，渡辺哲也：GFRP 引き抜き成形材を用いた床版橋形式歩道橋の設計と使用性，2011.

(Received August 25, 2023)

BENDING LOADING TEST AND FLEXURAL EVALUATION ON PULTRUDED FRP GIRDERS

Atsuki KAJIHARA, Hitoshi NAKAMURA, Kensuke KOBAYASHI,
Koichi HANAMURA and Toshiyuki NIKURA

To solve the problem of increased weight in steel underdeck panel construction, we are developing a strengthening method using FRP girders, which are lightweight and easy to construct, are placed in a grid configuration from the underside of the RC slab. The FRP girders are planned to be applied to the I-shaped HFRP girders consisting of pultruded carbon fiber and glass fiber, and double web GFRP girders consisting of glass fibers. In this study, three- and four-point bending loading tests were conducted on full-scale FRP girders to experimentally investigate their bending properties such as bending strength, failure modes, and deflection, in preparation for the practical use of FRP girders for reinforcing RC slabs. The results showed that the FRP girders were safe enough for the design loads and could be applied to reinforcement of RC slabs. The results of vertical displacements calculated by converting anisotropic material properties into isotropic ones and using shell elements and beam theory made of isotropic materials showed that the experimental values could be evaluated with high accuracy.