

FRP 歩道橋の主桁部材設計法に関する研究

Study of strength design method for main beam component
of FRP footbridge

上林正和*, 西崎 到**, 武内幸生***, 渡辺哲也****, 平山紀夫*****, 宮永直弘*****

Masakazu Kamibayashi, Itaru Nishizaki, Yukio Takeuchi,
Tetsuya Watanabe, Norio Hirayama and Naohiro Miyanaga

*三菱重工業株式会社 技術本部横浜研究所 (〒231-8715 神奈川県横浜市中区錦町十二番地)

**工博 (独)土木研究所 材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

***工修 三菱重工業株式会社 技術本部横浜研究所 (〒231-8715 神奈川県横浜市中区錦町十二番地)

****工修 旭硝子マテックス株式会社 C&A 事業部 (〒229-1112 神奈川県相模原市宮下1-2-27)

*****工博 日東紡績株式会社 グラスファイバー事業部門生産本部 (〒963-8061 福島県郡山市富久山町福原字塩島一番地)

*****工修 日東紡績株式会社 グラスファイバー事業部門生産本部 (〒963-8061 福島県郡山市富久山町福原字塩島一番地)

FRP material is very lightweight and has the feature of corrosion resistance. However, when applying FRP to the main components of a footbridge, the effective design method is not established in Japan now. The reason is because the material characteristic of FRP differs from it of steel. Especially in a design stage of bridge, there is a problem in the base strength for design (safety ratio), buckling strength of composite material, Lowness of the elastic modulus of economical GFRP, Flexibility of the manufacturing of a large-sized component, etc.

Therefore, in this study, in order to establish the design method for FRP main beam component being simply efficient, we proposed the design method by the buckling strength of composite plate, and the mitigation of deflection limit, and performed the trial design.

In order to evaluate the reliability of the design method, we made the main beam component by Build up FRP materials made by pultrusion process, and performed the bending strength test.

Key Words : foot bridge ,grass fiber resonance plastic , main beam , structural design , FEM

1. 緒言

橋梁の主要部材として、軽量性と耐食性に優れている FRP 材料を適用する場合、剛性が低くたわみ決定型の断面となる、降伏点がなく設計基準強度および安全率の考え方が異なる、材料異方性による座屈限界強度を考慮する必要がある、大型成形品の成形法に自由度がある等の課題があることから、設計手法が確立されていないのが現状である。

そこで、本研究では橋梁の主桁部材に FRP を適用する場合に、材料特性を十分に生かす効率的な設計法の検討および試設計を行い、実験による検証を行った。

2. 橋梁形式の選定

設計対象の橋梁として、道路橋の場合は、「道路橋示方書・同解説」¹⁾によると設計荷重はB活荷重となり FRP 材料にとって非常に厳しい設計条件が想定されるため、FRP

主桁設計の検討対象は、まず群集荷重による歩道橋とした。

また橋梁形式は、FRP を用いることで比較的自由にできる可能性や、FRP の利点を生かした新しい形式が期待されるが、ここでは道路橋示方書によって設計した場合の設計上の要素的な問題点を抽出することを目的に、Fig.1 に示す標準的な鉄桁構造とし、主桁はI型断面として検討した。

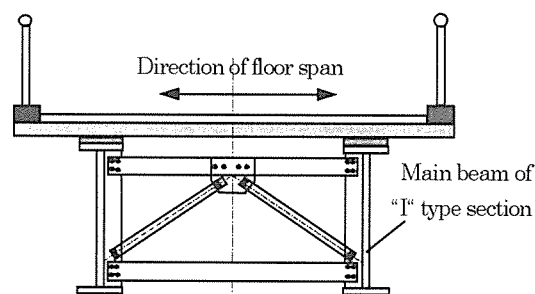


Fig.1 Schematic diagram of the footbridge with main digits made by FRP materials

3. FRP 主桁部材設計法の考え方

FRP 主桁部材の強度設計法に関して、その設計手順や照査内容の考え方を Fig.2 に示す。

簡易設計法を目的に、従来の橋梁で一般的な「道路橋示方書・同解説」¹⁾をベースとした場合、鋼材では降伏点を基準として許容応力度を求めるが、FRP は完全弾性材料のため材料の引張強度が基準強度となり、安全率の考え方を見直す必要がある。

また座屈強度に注目すると、鋼材では降伏点まで作用する考え方により、幅厚比は式(3a)のオイラー座屈強度¹⁾によって規定され FRP 材料には適用できない。そこで、異方性積層板での座屈強度の考え方を導入した。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\mu^2)}{\pi^2 k}} \quad (3a)$$

b : 板幅, t : 板厚
 σ_y : 降伏点, E : ヤング率
 μ : ポアソン比, k : 座屈係数

また、FRP 中でも経済的な GFRP は鋼材に比べて剛性が低く、歩行者通行時の振動やたわみが大きくなることが懸念される。鋼橋での基本たわみ許容値（支間長の 1/600）をそのまま適用すると GFRP には厳しく、材料の特徴を生かした強度設計とならない。そこで、たわみ制限については「立体横断施設技術基準・同解説」²⁾に「利用者への影響について特に配慮を加えた場合には支間長の 1/400 まで

として良い」とあることから、本基準を許容たわみとして検討することとした。

なお、FRP 材料での注意点として初期不整の扱いとクリープの影響などが考えられるが、FRP 橋梁の場合には死荷重比率が小さいこと等から、これらの影響は小さいと仮定し、安全率として考慮した。

4. 許容応力度・安全率

FRP の許容応力度・安全率の考え方については、FRP 構造設計便覧³⁾を基礎に、土木構造部材に適した許容応力度と安全率の考え方を検討した。

FRP では Fig.3 に示すように、静的物性値 σ_s に環境因子および静的・動的荷重に対する物性保持率 R を掛けた「限界値 σ_m 」を設定し、その限界値 σ_m を、設計精度や材料バラツキを考慮して安全率 F で割った値を許容応力度 σ_a とする。主桁設計においては、静的物性値と許容応力度の比を「総安全率」として用いることとした。

$$\sigma_m = \sigma_s \times R \quad (4a)$$

σ_m : 限界値, σ_s : 静的物性値
R : 物性保持率（環境因子×荷重に対する）

$$\sigma_a = \sigma_m / F \quad (4b)$$

σ_a : 許容応力度, F : 安全率

5. FRP 座屈強度による照査法

座屈強度の照査法として、まず複合則による直交異方性を断面計算に適用した。次に、座屈強度の照査では異方性積層材料の座屈強度算理論式を用いて、強度照査には最大応力説を使用した。理論式は、FRP 構造設計便覧³⁾、複合材料工学⁴⁾、平板構造強度設計便覧⁵⁾を基礎に検討した。

5.1 FRP 積層板の断面剛性計算

異方性積層板モデルとして、対象 8 層積層を仮定した。積層構成と弾性係数を、Fig.4 および Table.1 に示す。式(5a)により各積層の剛性成分を求め、引抜軸方向と θ だけ傾いて積層された積層部は式(5b)により補正を行った。

積層理論である式(5c)により、異方性積層板の剛性マトリクス成分を計算した。

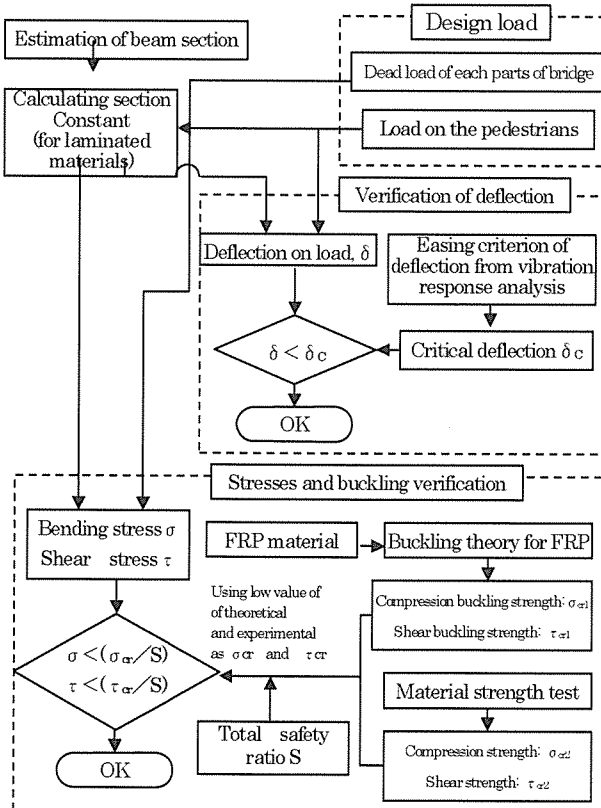


Fig.2 Flow chart for designing main beam made by FRP

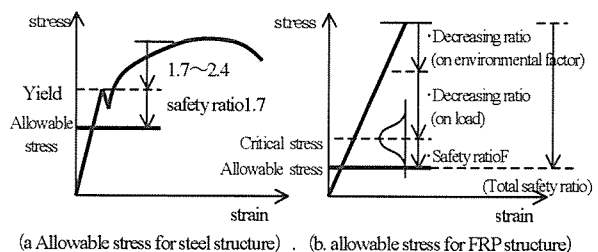


Fig.3. Allowable stresses and safety ratios for steel structure and FRP structure

5.2 座屈強度の算出

異方性積層材料の座屈強度は式(5d), 式(5e)に示す直交異方性矩形板の圧縮座屈強度 σ_{cr} と, セン断座屈強度 τ_{cr} の理論式を利用した. 式(5e)の係数 C_a は, 「複合材料工学」⁴⁾に示される設計線図により求められる.

$$\sigma_{cr} = \frac{2\pi^2}{t \cdot b^2} \cdot \left[\sqrt{D_{11} \cdot D_{22}} + D_{12} + 2D_{66} \right] \quad (5d)$$

$$\tau_{cr} = C_a \frac{\sqrt[4]{D_{11} \cdot D_{22}^3}}{(b/2)^2 \cdot t} \quad (5e)$$

ここで b は圧縮荷重の有効幅であり, 道路橋示方書・同解説⁴⁾にあるように, 応力勾配により式(5f)~(5h)を用いて補正した. なお, I 桁の応力勾配補正係数 f は, ウェブ: $f=3.86$ (完全曲げ勾配), フランジ: $f=1.0$ (全面一様荷重) となる.

$$b = b_0 / f \quad (5f)$$

b_0 : 部材幅 (ウェブ高, フランジ突出幅)

f : 応力勾配補正係数

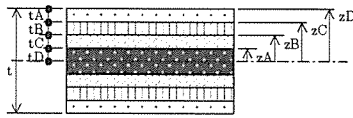


Fig.4. Details of laminated constitution of FRP material (with 8 layer laminated)

Table.1 Elastic modulus of each layer of FRP (with 8 layer)

Layer	1st	2nd	3rd	4 th
Elastic modulus (Parallel direction for fiber) E_1	E_{1A}	E_{1B}	E_{1C}	E_{1D}
Elastic modulus (Vertical direction for fiber) E_2	E_{2A}	E_{2B}	E_{2C}	E_{2D}
Poisson ratio (Parallel) ν_{12}	ν_{12A}	ν_{12B}	ν_{12C}	ν_{12D}
Poisson ratio (Vertical) ν_{21}	ν_{21A}	ν_{21B}	ν_{21C}	ν_{21D}
Shear Elastic modulus G_{12}	G_{12A}	G_{12B}	G_{12C}	G_{12D}

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (5a)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}},$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

$$\begin{cases} \bar{Q}_{11} = Q_{11} \cdot \cos^4 \theta + 2 \cdot (Q_{12} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \theta + Q_{22} \cdot \sin^4 \theta \\ \bar{Q}_{12} = Q_{12} \cdot (\cos^4 \theta + \sin^4 \theta) \\ \bar{Q}_{22} = Q_{11} \cdot \sin^4 \theta + 2 \cdot (Q_{12} + 2 \cdot Q_{66}) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta + Q_{22} \cdot \cos^4 \theta \\ \bar{Q}_{66} = G_{12} \end{cases} \quad (5b)$$

$$\text{Elastic module Matrix } D_y = (1/3) \cdot \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (5c)$$

$(i, j) = 1, 2, 6$

$$f = 0.65 \left(\frac{\varphi}{n} \right)^2 + 0.13 \left(\frac{\varphi}{n} \right) + 1.0 \quad (5g)$$

$$\varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} : \text{応力勾配} \quad (5h)$$

σ_1, σ_2 : 板両端での縁応力度

5.3 主桁部材の座屈照査

設計応力は, 死荷重+群集荷重を用いて, 単純梁計算により曲げ応力 σ , セン断応力 τ を算出した.

Fig.5 に示す I 型主桁構造の考え方により, ウェブは圧縮とセン断の組合せ応力とし, その照査は式(5i)による放物線近似とした⁵⁾.

またフランジは, 全面一様圧縮とし, 式(5j)に示す圧縮座屈応力による照査とした.

$$\text{(ウェブ照査)} \left\{ \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right) + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right)^2 \right\} \cdot S < 1 \quad (5i)$$

$$\text{(フランジ照査)} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right) \cdot S < 1 \quad (5j)$$

σ : 設計曲げ応力, τ : 設計セン断応力

σ_{cr} : 圧縮座屈強度, τ_{cr} : セン断座屈強度

S : 総安全率(静的物性値と許容応力度の比)

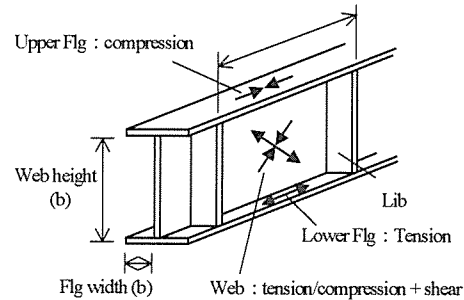


Fig.5 Schematics of type I main beam

6. 振動応答解析による活荷重たわみの緩和

6.1 検討モデルおよび解析条件

振動計算のモデル化は床版も含めたものが理想であるが, ここでは主桁のみの安全側の評価とした. 桁高1.0mと1.2mを想定し, 活荷重たわみ制限を無視して応力により決定したCase1-1, 2-1, 活荷重たわみ $\leq L/600$ で決定されるCase1-2, 2-2, たわみ制限 $L/400$ (Case3) および $L/300$ (Case4) へ緩和した場合 (断面2次モーメントのみ設定) とした.

なお断面設計モデルは実用的橋長20mとし, 曲げ強度 $\sigma_a=300\text{MPa}$, セン断強度 $\tau=100\text{MPa}$, 弾性係数 $E=20,000\text{N/mm}^2$, 総安全率は国内施工実績の沖繩FRP歩道橋⁹⁾の $S=3.2$ と仮定し, 許容応力度を用いた単純梁計算による照査を行った. 断面試算結果をTable.2に示す.

活荷重は、以下に示すように幅員 3.5m 内に歩行者 70kgf×5 人が平行して同調で(2Hz, 速度 1.3m/s)歩く条件とした。減衰は 1.5%および0.75%とし、加振力は歩行時における片足の載荷重 $F_0=0.4F$ を用いた。

6.2 解析方法

歩行者が支間中央で足踏みした定常応答と、移動する場合の過途応答の計算を行い、歩行者の歩調範囲1.5～2.3Hz²⁾における最大応答での照査を行った。

固有振動数は、単純梁の応答理論値解によって算出し、固有振動数の計算結果から、歩調範囲1.5～2.3Hzに近い「1次モード」での解析を行うこととした。

人が移動しない場合の振動応答は、バネ定数を求めて振動解析を行った。

人が移動する場合の過途応答については、振動モードを式(6a)に示すように仮定した。

$$\phi_n(x) = \sin \frac{n\pi x}{l} \quad (6a)$$

運動方程式は、モード座標 q を用いて式(6a)のように表せられ、1次モードの時刻歴応答解析を行った。

$$\begin{aligned} \ddot{q}_n + 2h_n\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2 q_n &= \frac{f(x)\phi_n}{m_n} \\ &= \frac{1}{m_n} (F_0 \cos \omega t \cdot \sin \frac{n\pi x}{l}) \end{aligned} \quad (6b)$$

6.3 解析結果

歩行者足踏みでの周波数応答結果例をFig.6に示す。応力決定断面(Case 1-1)では固有振動数 $f=1.42\text{Hz}$ であり、歩調範囲内1.5～2.3Hzに近かった。なお、桁高1.2mの応力決定断面 (Case 2-1) の共振点は歩調範囲内にあり応答が大きい。また、たわみ決定断面(Case 1-2)では固有振動数は $f=3.81$ と歩調範囲を大きく外れており、たわみL/400決定断面 (Case 3) も $f=3.08$ であり大きめに外れていた。

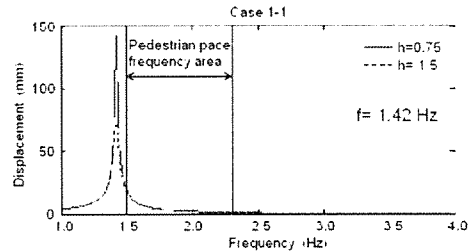
共振点を外れた殆どのケースでは、足踏みの場合よりも移動した場合の方が応答は大きくなっていったが、共振しているCase 2-1は応答絶対値が大きく、移動よりも足踏

みの方が大きくなった。また減衰による差違に注目すると、減衰の大きい方が最大応答が下がっていたが、設計ケースによる影響の方が大きかった。

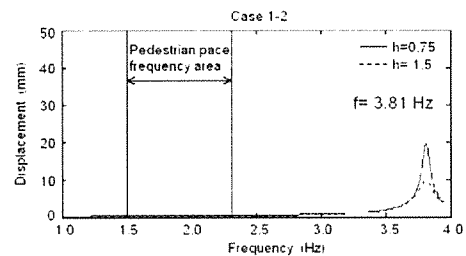
6.4 振動応答に対する照査果

歩道橋使用性の、加速度応答の基準は以下がある。

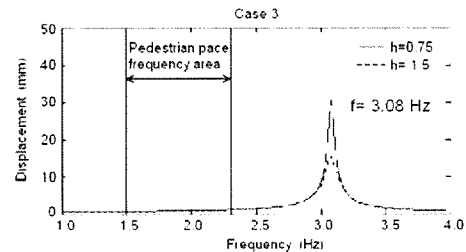
- ・0.1G 以下：「立体横断施設技術基準」(推奨値)
- ・ $0.5\sqrt{f}$ 以下：「BS5400」⁷⁾ (f : 橋梁1次固有値)



(a. Case 1-1 Section for determination of stress, beam height :1.0m)



(b. Case 1-2 Section for determination of deflection, beam height :1.0m)



(c. Case 3 Section for determination of deflection L/400)

Fig.6. Example of frequency response obtained from test with the pedestrian

Table.2. Results of appropriate dimensions of main beams calculated from the vibration analysis

Case	1-1	1-2	2-1	2-2	3	4
Height [m]	1	1	1.2	1.2	—	—
Determination	Stress	Deflection L/600	Stress	Deflection L/600	Deflection L/400	Deflection L/300
Beam number	2	5	2	3	—	—
Web	Height H	H960	H1000	H1200	H1200	—
	/Thickness	t12	t15	t9	t15	—
Flg	Width B	B320	B350	B260	B350	—
	/Thickness	t12	t35	t11	t40	—
Total I [mm ⁴]	5.40 × 10 ⁹	39.1 × 10 ⁹	6.79 × 10 ⁹	38.8 × 10 ⁹	25.5 × 10 ⁹	19.1 × 10 ⁹

Table.3. Spring constants for each calculating case

Case	1-1	1-2	2-1	2-2
Degree				
ω	8.906	23.96	9.986	23.87
$k=m\omega^2$	638.6	4621.6	802.9	4587.6

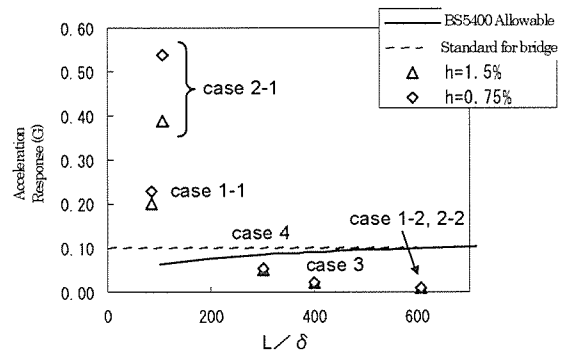


Fig.7 Maximum response of acceleration for each calculating case

各設計ケースでの応答加速度と、これら許容値との照査を Fig.7 に示す。Case 1-1,2-1 では基準値を大きく超えるが、たわみ L/600 制限 (Case 1-2,2-2) では十分安全側にある。また、たわみ制限 L/300 や L/400 の場合でも許容値以下の応答となることが判る。

更に、歩行者の振動感覚に対して振動速度のじょ限度を 1.7 [cm/s]⁹⁾ とした場合、たわみ制限 L/400 では 1.5 [cm/s] であり許容範囲内となる。

以上の結果から、振動照査により FRP 橋梁のたわみ許容値の緩和が検討できることを示した。

7. FRP 主桁の試設計・製作・実験検証

設計異方性積層材料の座屈理論による設計照査, FRP 材料のたわみ評価に関する設計法の信頼性を検証することを目的に、実験用主桁部材の試設計、製作および曲げ実験を行った。

7.1 FRP 主桁の試設計

本研究で検討した設計手法の妥当性を検証するための実験を想定し、支間 3m とした 4 点曲げ荷重状態 (荷重点直下: 補剛材間隔 1m) にて、座屈強度により決定される断面 (H450) と、たわみ制限により決定される断面 (H150) の 2 タイプの設計を行った。

実験用試設計断面を Fig.8 に示す。上下フランジに薄板の CFRP を貼り付ける事で、GFRP の低剛性を補うモデルとした。また詳細設計値について座屈決定型を Table.4 に、たわみ決定型を Table.5 に示す。4 点曲げ荷重においてウェブ座屈限界、たわみ限界が先行する設計値である。

なお、実橋を想定した支間 10m の主桁に関する設計ディテールは、Fig.9 に示すような桁高 600mm/フランジ幅 200~300mm となった。

7.2 FRP 主桁の製作

橋梁の主桁部材に適用する FRP 材料は、経済性、材料加工性に優れている GFRP を対象とした。成形法については主に一体引抜成形、ハンドレイアップ、引抜成形部材を二次接着加工により構築するビルトアップが考えられるが、橋梁主桁の場合では大型部材が必要となることからビルトアップを採用した。

ウェブとフランジおよび補剛材の接合は Fig.10 に示すようにアングル材を用いて接着接合し、剛性を確保するために CFRP を上下フランジに接着接合する構造とした。供試体に用いた材料の積層構成は Table.6 に示す通りである。

7.3 4 点曲げ試験

(1) 試験条件

静的曲げ試験は、Fig.11 のような 4 点曲げとした。載荷部には、応力集中を避けるため鋼板とゴムを入れた。また治具により横倒れを防ぐ事とした。

ひずみゲージによる応力測定位置は、Fig.12 に示すように支間中央、補剛材間中央で、ウェブ中央と上下端、フラ

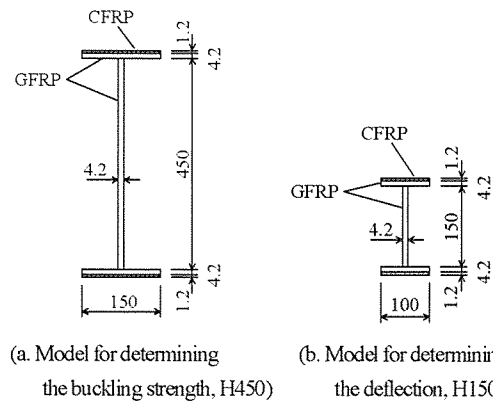


Fig.8 Models of beam for 4 point bending tests (span:3m)

Table.4 Results of stresses and bends obtained from tests with the H450 model.

	Bending (Web compression) [N/mm ²]	Shear [N/mm ²]	Deflection [mm]
Design strength	71.6	6.7	7.50
Load on pedestrian	Design stress 9.8	3.5	0.38
	Verification*	1.30 (S=3.2)	0.05
4-point bending test	Buckling load	21.2 [kN] (load point 2)	
	Design stress	21.1	5.6
	Verification	Web buckling limit (S=1)	
			0.27

* verification value : 1<<OK, 1>NG.

Table.5 Results of stresses and bends obtained from tests with the H150 model.

	Bending (Web compression) [N/mm ²]	Shear [N/mm ²]	Deflection [mm]
Design strength	419	54.1	7.50
Load on pedestrian	Design stress 51.3	10.4	5.28
	Verification*	0.51 (S=3.2)	0.70
4-point bending test	Buckling load	5.74 [kN] (load point 2)	
	Design stress	53.2	8.1
	Verification	0.48 (S=3.2)	
			Deflection limit (L/400)

* verification value : 1<<OK, 1>NG.

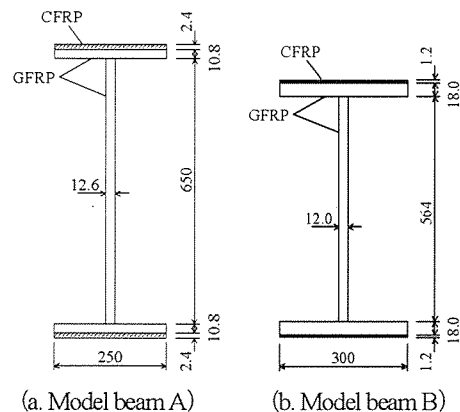


Fig.9 Example of models of main beam with 10m span

ンジ中央と端部とした。また、補剛材も一部計測した。主桁たわみは支間中央を計測した。

(2) 試験結果

座屈決定タイプ(H450)のウェブ中央の曲げひずみを Fig.13 に示す。ここでの曲げひずみは、Fig.12 の 1-1 断面ウェブ中央部に貼り付けた表裏 2 枚のひずみゲージ(f,l)から算出した。曲げ荷重が 20kN あたりから線形性を失い、徐々に Fig.14 に示す座屈現象が発生した。ここで、座屈点に変曲点の 31.3kN とした。設計値は線形性を保持しなくなる 21.2kN であり、安全側に一致していると考えられる。

たわみ決定タイプ(H150)での支間中央の変位を Fig.15 に

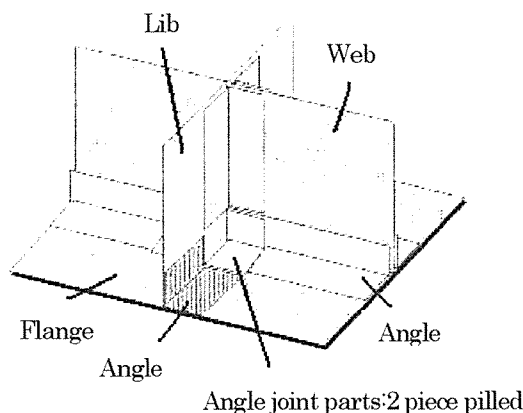


Fig. 10 Schematics of joint of FRP beam

Table.6 Laminated constitution of FRP for main beam

Component	Material	Fabrication method	Resin	Constitution
Web	GFRP	Pull out	Vinyl ester	CSM : 10.0%
				$\pm 45^\circ$: 13.3%
Flg.	GFRP	Pull out	Vinyl ester	ROV : 53.4%
				$\pm 45^\circ$: 13.3%
Angle	GFRP	Hand lay up	Vinyl ester	CSM : 10.0%
	CFRP	Pull out	Epoxy	TOW : 100%
	GFRP	Hand lay up	Vinyl ester	CM : 100%

(Notes) CSM : Glass continuous strand mat
 $\pm 45^\circ$: Glass knit fabric ($\pm 45^\circ$ direction)
 ROV : Glass roving (0° direction)
 TOW : Carbon tow (0° direction)
 CM : Glass chopped strand mat

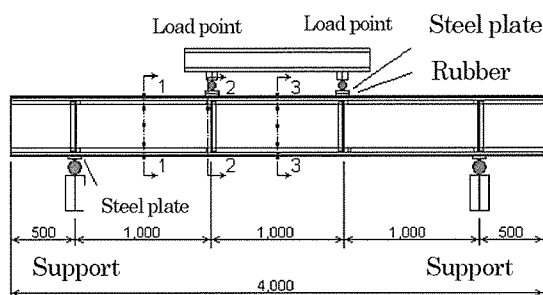
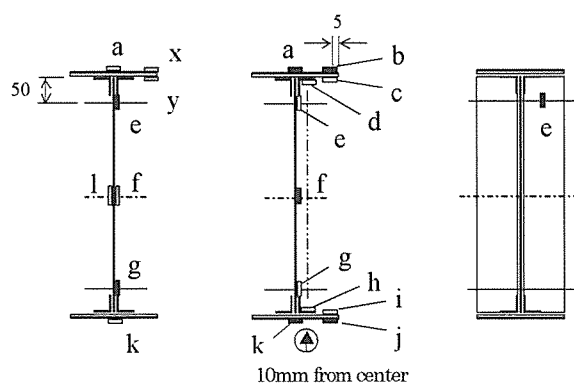


Fig. 11 Schematic diagram of 4-point bending test

示す。たわみ限界(L/400)の設計値は実験値と良く一致していた。なお、更に荷重を増加させて約 25kN、たわみ 35mm(L/85)付近になると、支間中央部において Fig.16 に示すような上フランジに貼り付けた CFRP が剥離破壊を始めた。

以上の実験結果と試設計値の比較を Table.7 に纏める。座屈決定タイプでは、設計座屈荷重が実験でのひずみが線形限界となる荷重と良く一致し、たわみ決定タイプでは試設計と実験での荷重-たわみ線図が良く一致した。本研究での FRP 主桁設計法により評価が可能であることが分かった。



(a. 1-1 section) (b. 2-2 section) (c. 3-3 section)

Fig. 12 Putting positions for strain gages

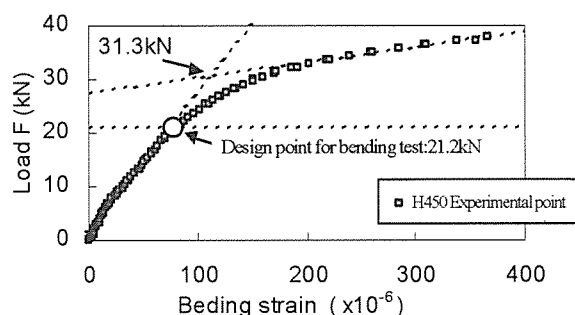


Fig. 13. Relationship bending strain and load for H450 model



Fig. 14. Observation result of buckling test of H450 model (on the center of Web)

8. 緒言

本研究では、経済的な FRP 主桁部材設計法の構築を目的に、たわみ制限緩和の検討や、異方性積層板の座屈強度を用いた設計照査法を提案し、試設計を行った。更に、引抜成形品を用いたウェブとフランジのビルトアップ引抜成形主桁部材の試作、曲げ実験を行い、設計法の信頼性に関する評価を行った。その結果、以下の結論が得られた。

8.1 FRP 材料の安全率と座屈設計の提案

FRP 主桁の設計法に関して、従来の橋梁で一般的な「道路橋示方書・同解説」¹⁾をベースとし、異方性積層板での座屈強度の考え方や、FRP 材料での許容応力度と安全率の考え方を導することで FEM 解析を含まない簡易な計算のみで行う方法を提案し、4 点曲げ試験によりその試設計の精度を検証できた。

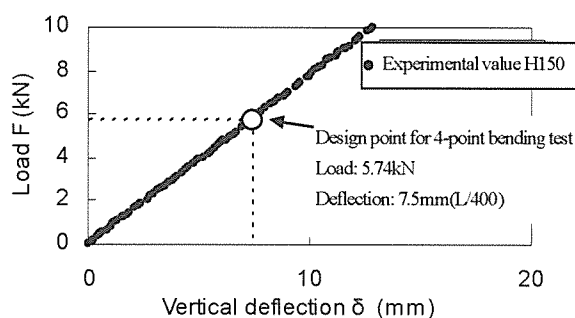


Fig.15. Relationship between vertical deflection and load from H150 model

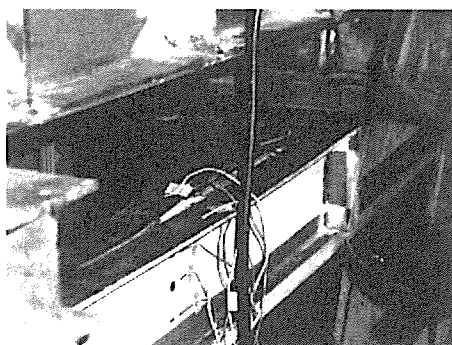


Fig.16. Stripping of CFRP on upper flange of H150 model (on the center of Span)

Table.7 Comparison calculations and tests of buckling stresses and deflections

		Design	Experiment
Determination of buckling stress H450	Buckling load	21.2kN	Linear limit: 20kN Turning point : 31.3kN
	Deflection*	0.95mm	1.33mm
Determination of deflection H150	Design load	5.74kN	
	Deflection	7.5mm	7.4mm

*Deflection on center of beam at 10kN of 4-point bending load

8.2 たわみ制限緩和の検討

鋼材に比べて剛性の低い GFRP を効率良く適用するために、歩行者通行時の振動解析と照査により、許容たわみ制限を $L/600$ から $L/400$ まで緩和できる見通しを得た。

なお本研究は、土木研究所公募型共同研究「FRP を用いた橋梁の設計技術に関する共同研究」の一環として行われたものである。

謝辞:FRP 材料の座屈強度や許容応力度の設計に対する考え方に関しては、豊橋技術科学大学の山田聖志教授に御指導を頂きました。末筆ながら感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, (社)日本道路協会, 2002.03.
- 2) 立体横断施設技術基準・同解説, (社)日本道路協会, 1979.01.
- 3) FRP 構造設計便覧, (社)強化プラスチック協会, 1994.
- 4) 林毅: 複合材料工学, 日科技連(林毅 編), 1971.
- 5) 関谷壮, 浜田実, 角誠之助: 平板構造強度設計便覧, (社)土木学会, 朝倉書店, 1982.
- 6) FRP 橋梁 -その技術と展望-, (社)土木学会, 構造工学シリーズ 14, 2004.
- 7) BS5400, British Standard Institution
- 8) 梶川康男: 振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察, 土木学会論文報告集 325 号, 1982.9.
- 9) JIS K6850, 日本規格協会, 1999.