

ビルトアップ FRP 橋梁主桁の構造設計と FEM 解析

Structural Design and FEM analysis of Built-up FRP Bridge Girder

平山紀夫*, 宮永直弘**, 渡邊哲也***, 上林正和****, 西崎 到*****

Norio Hirayama, Naohiro Miyanaga, Tetuya Watanabe, Masakazu Kamibayashi, Itaru Nishizaki

* 工博 日東紡績株式会社, 生産本部FRP開発グループ (〒963-8061 福島県郡山市富久山町福原字塩島1)

**工修 日東紡績株式会社, 生産本部FRP開発グループ (〒963-8061 福島県郡山市富久山町福原字塩島1)

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

**** 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 12)

***** 工博 (独)土木研究所, 材料地盤研究グループ (〒305-8516 神奈川県相模原市宮下 1-2-27)

Before FRP is used as the bridge girder, one must resolve a number of issues, including those related to safety, economy and technology. This paper is intended to report trial product, strength test, structural design and FEM analysis of built-up FRP bridge girder for the purpose of resolving these problems. FEM analysis and structural design results showed good agreement with strength test result. This indicates that the built-up FRP is applicable to main bridge girder. And the validity of the analysis and structural design method proposed in this paper was shown by this experiment result.

Key Words: built-up, FRP, Bridge Girder, Structural Design, FEM

キーワード: ビルトアップ, 繊維強化プラスチック, 橋梁主桁, 構造設計, FEM

1. 緒 言

FRPの大型成形品は、そのほとんどがハンドレイアップ法で成形されている。その主な理由は、他の機械成形法では成型型やプレス等の付帯設備が大掛かりになり、成形品のコストに占める設備投資の比率が大きくなり、経済的に他材料との競合に勝てないからである。しかしながら、土木・建築分野等の構造部材にFRPを適用しようとするれば、ハンドレイアップ法による成形品には品質や強度の安定性といった課題が残る。一方、引抜成形法は、成形品の優れた寸法精度、強度の均一性、高い生産性等のハンドレイアップ法が内在する課題を解決できる優れた成形法であるが、逆に、少量の成形品や大型断面形状の成形品には不向きである。したがって、引抜成形品はFRP橋梁の主要構造材として注目されているが、このような理由から実用化には至っていない。

以上の課題を解決し、土木・建築分野等における主要構造部材への引抜成形品の経済的な適用方法として、予め成形された引抜成形品を要求される強度・剛性に応じてビルトアップする方法が考えられる。この引抜成形品をビルトアップする方法は、大型の金型や牽引装置等の特別な付帯設備が必要なく、少量の成形品や大型断面形状の成形品にも柔軟に対応できるといった利点があり、従来では適用を

断念していた市場にもFRPの用途展開を期待できる。しかしながら、ビルトアップされた引抜成形品を大型の構造部材に適用し、その構造設計と解析から実験・評価まで行なった研究はほとんど見当たらないのが現状である。

本研究では、歩道橋に適用するFRP製の主桁を製品例とし、予め成形されたGFRPとCFRPを要求される強度・剛性に応じてビルトアップする方法で、試設計、試作、FEM解析および実験を行なった。特に、初期の橋梁主桁の構造設計の段階では、鋼製の橋梁主桁の設計指針をFRPの異方性を考慮した形で修正し、その妥当性について検討した。さらに、予め成形されたGFRPとCFRPをビルトアップした引抜成形品においても、積層シェル要素を使用した有限要素解析がどの程度の精度で解析が行なえ、実用上有用であるか併せて検討を行なった。

2. FRP 橋梁主桁の試設計

2.1 FRP 橋梁主桁の試設計の流れ

FRP 橋梁主桁の構造設計に関しては、現在の我が国には明確な指針となるものが存在しない。そこで、本研究では基本的には「道路橋示方書・同解説」¹⁾の手順に則り、以下の3点の変更を同示方書に加えてFRP 橋梁主桁の試設計を行なうこととした。

- (1) 主桁材料の直交異方性を複合則により算出し、断面特性の計算に適用する。
- (2) 座屈強度の照査の式を異方性積層材料の座屈強度の算出式に変更し、強度の照査には最大応力説を使用した。
- (3) 主桁のたわみの計算に曲げたわみ以外に、せん断たわみの項を加えた。

(1)では、古典的な複合則²⁾と積層理論式³⁾を使用した。また、(2)の異方性積層材料の座屈強度の算出には、式(1)、(2)に示す直交異方性矩形板のせん断座屈強度 τ_{cr} の式⁴⁾と圧縮座屈強度 σ_{cr} の式⁴⁾を利用し、特にウェブに作用する圧縮応力 σ とせん断応力 τ の組み合わせ応力下での座屈強度の照査は、式(3)に示す放物線近似により計算した⁵⁾。

$$\tau_{cr} = C_a \frac{\sqrt[4]{D_{11} \cdot D_{22}^3}}{(b/2)^2 \cdot t} \quad (1)$$

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

$$\left\{ \left(\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right) + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr}} \right)^2 \right\} \cdot S < 1 \quad (3)$$

ここで、 D_{ij} は積層理論から求めた異方性積層板の剛性マトリックスの各成分、 S は安全率である。

2.2 均質化法による使用基材物性値の計算

FRPの材料物性値の予測には、複合則による計算が最も簡便で実用性も高い。しかしながら、複合則による計算では、複雑な強化基材への適用が困難であり、全ての材料定数が精度よく予測できるわけではない。そこで、本研究では有限要素法との整合性が高く、複雑な強化基材の材料物性値の計算も可能な均質化法による材料物性値の予測を試みた。また、引抜成形品の表面層に配置するマット基材に関しては、式(4)に示す複合則により計算を行った⁶⁾。

$$\begin{aligned} E_{mat} &= \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2 \\ G_{mat} &= \frac{1}{8} E_1 + \frac{1}{4} E_2 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 E_{mat} 、 G_{mat} はそれぞれマット基材の等方性弾性係数およびせん断弾性係数、 E_1 、 E_2 はそれぞれ一方向材の繊維方向における弾性係数および繊維方向と面内垂直方向の弾性係数である。ただし、一方向材の弾性係数 E_1 、 E_2 は、均質化法により繊維体積含有率 V_f 25%として計算した値を使用し、マット基材のポアソン比 ν は0.34とした。

均質化法による材料物性値の予測に使用した炭素繊維一方向材の解析モデル(V67%)をFig.1に示し、実際に式(4)で計算したマット基材の材料物性値と、Fig.1で示した均質化法によるFEMモデルで計算したガラス繊維一方向材(V65%)と炭素繊維一方向材の材料物性値をTable.1に

示す。また、本研究で検討している引抜成形品では、Fig.1に示すような一方向材を任意の角度で配置するためには、一方向材にステッチ加工を行いシート基材により実際の引抜成形が行われる。したがって、均質化法による材料物性値の予測をこのようなステッチ基材単位で行うことも考えられる。しかしながら、本研究では設計の簡便性を優先させ、ステッチ基材としての物性予測はFig.1のような一方向材が積層されているとして算出することとした。

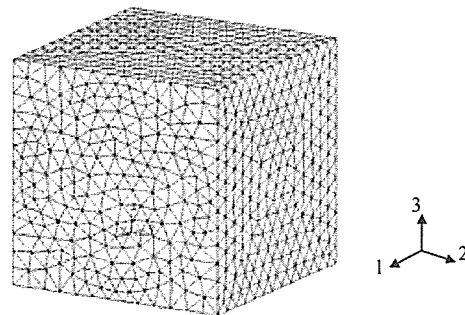


Fig.1 Analytical model of unidirectional CFRP

Table.1 Material properties of FRP

	Mat reinforcement	Unidirectional reinforcement	
		GFRP	CFRP
E_1 (GPa)	9.68	40.6	148
E_2 (GPa)	—	13.6	11.2
E_3 (GPa)	—	13.6	11.2
G_{12} (GPa)	3.45	5.19	4.06
G_{23} (GPa)	—	4.13	2.69
G_{13} (GPa)	—	5.19	3.03
ν_{12}	0.34	0.248	0.239
ν_{23}	—	0.346	0.313
ν_{13}	—	0.248	0.281

3. FRP 橋梁主桁の試作と4点曲げ試験

3.1 ビルトアップFRP 橋梁主桁の設計と試作

ビルトアップするFRP橋梁主桁は、経済性を考慮して既存の型材を組み合わせることで、設計した断面特性を実現できるよう選定した。特にビルトアップ工法であれば、成形時の線膨張係数の違いから同時に引き抜くことが困難なガラス繊維と炭素繊維とのハイブリッド成形品を得ることが可能となる。この組み合わせの自由度の高さを利用し、フランジ部にはCFRPとGFRPのハイブリッドFRPを採用した。前節で述べたFRP用に修正した「道路橋示方書・同解説」の設計手順に従って、スパン $L=4m$ の歩道橋用のFRP主桁の試設計を行なった。Fig.2には試設計を行なった4m主桁の断面寸法を示す。

また、Table.2には本開発で試設計した4m主桁の材料仕様を示す。また、これら2つの引抜成形品の材料物性値の実験値とTable.1に示した複合則および均質化法により計算した材料物性値を用いて積層理論により算出した理

論解を比較して Table.3 に示す。Table.3 から明らかなように、設計計算に使用した材料物性値の計算値と材料試験で得られた弾性係数の実験値は良く一致した。

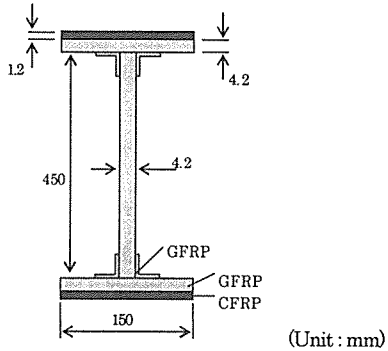


Fig.2 Schematic view of FRP main bridge girder

Table.2 Material specifications of FRP main bridge girder

GFRP	CSM ^{※1} / $\pm 45\text{stitch}$ ^{※2} / UD ^{※3} / $\pm 45\text{stitch}$ / CSM
CFRP	TOW ^{※4}

※1 Glass continuous strand mat

※2 Glass knit fabric ($\pm 45^\circ$ direction)

※3 Glass roving (0° direction)

※4 Carbon tow (0° direction)

Table.3 Material properties of FRP main bridge girder

		Theory		Experiment	
		GFRP	CFRP*	GFRP	CFRP
E_1	GPa	25.3	148	26.3	150
E_2	GPa	14.4	11.2	11.2	10.4
E_3	GPa	13.7	11.2	—	—
G_{12}	GPa	6.00	4.06	5.2	4.6
G_{23}	GPa	4.01	2.69	—	—
G_{13}	GPa	4.51	3.03	—	—
ν_{12}		0.365	0.239	0.35	0.32
ν_{23}		0.227	0.313	—	—
ν_{13}		0.269	0.281	—	—

Table.2 に示す材料を使用して開発した 4m 主桁の具体的な組み立ては、以下に示す手順で行なった。

- ①各部材のカットおよびサンディング等の表面処理
- ②ウェブ+接合用アングルの接着
- ③フランジ部の CFRP+GFRP の接着
- ④フランジ+ウェブの接着
- ⑤補剛材用部材のカット加工と接着

3.2 4点曲げ試験

試作した 4m 主桁が試設計と整合して製作できているかを確認するため、4点曲げ試験を行い剛性レベルと座屈強度について検証を行なった。試験は、10ton 油圧サーボ

式曲げ試験機（丸東製作所製）を用い、フランジやウェブ等に合計 28 箇所のひずみゲージを貼り付け、載荷荷重、ひずみおよびたわみ量の測定を行なった。Fig.3 に 4 点曲げ実験の状況を示す。

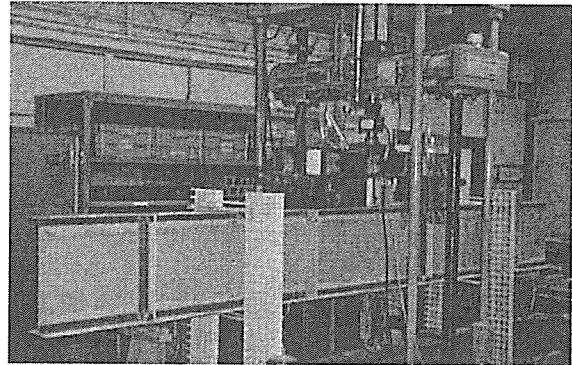


Fig.3 Photograph of 4-point bending test

4. FEM 解析と実験結果

4.1 FEM 解析

本試作の 4m 主桁の詳細な応力状態や変形挙動を解析するために、積層シェル要素を使用した FEM 解析を行なった。また、本 FEM 解析で使用した材料物性値は、Table.1 に示した複合則および均質化法により計算した材料物性値を積層シェル要素の各層の材料物性値として用いた。

4.2 試設計・線形 FEM 解析と実験結果との比較

Table.4 には、今回試作した 4m 主桁の試設計の値と線形 FEM 解析結果および実験結果とを比較して示す。ここで、たわみ量は載荷荷重が 10kN 時の中央部下面のたわみ量を示している。試設計の値は、たわみ量、座屈荷重ともに線形 FEM 解析結果および実験値と良く一致している。このことから、今回検討した「道路橋示方書・同解説」に準拠し、直交異方向性材料に適用できるように 3 点の修正を行なった FRP 主桁の設計手順の妥当性が確認できた。ここで、Table.4 で示す実験の座屈点は、Fig.4 に示すようにウェブ中央部に貼り付けた表裏 2 枚のひずみゲージから算出した曲げひずみを変曲する点を座屈点とした。Fig.5 には実験時観察されたウェブ中央部の座屈モードと FEM 解析による座屈モードを比較して示す。2 つのモードは良く一致しており、設計上極めて重要なウェブ積層部の座屈現象も積層シェル要素を使用した FEM 解析により評価が可能であることがわかった。

4.3 非線形 FEM 解析による座屈後挙動の解析

本開発のビルトアップした引抜成形品の場合には、座屈後の大変形領域で CFRP と GFRP の接着部での離れ亀裂の進展が懸念される。このため、幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析により座屈後の挙動を追従した解析を行い、接着部での特異な応力やひずみが発生していないか検討を行なった。幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析に

おけるウェブ中央部の曲げひずみを実験値と比較して Fig.6 に示す. Fig.6 から明らかなように, 幾何学的非線形性を考慮した積層シェル要素による FEM 解析は, 座屈後の実際の 4m 主桁の非線形挙動と精度よく一致している. そして, 今回, この FEM 解析結果から最初の座屈後すぐに接着部での局所的な応力やひずみの増大はみられず, 実験からも最初の座屈後すぐにはく離や亀裂の進展等の現象は観察されなかった.

Table.4 Comparison calculations and tests of deflection and buckling load

	Design	FEM	Experiment
Deflection (mm)	1.10	1.29	1.33
Buckling load (kN)	25.8	35.0	31.3

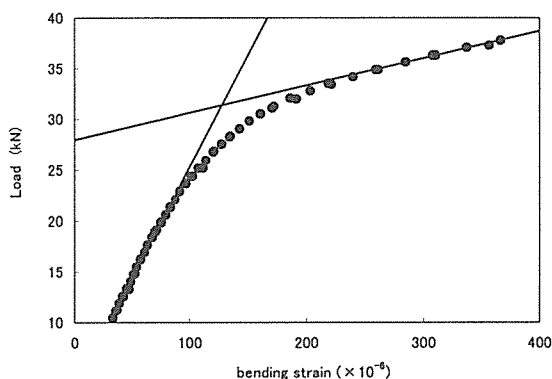
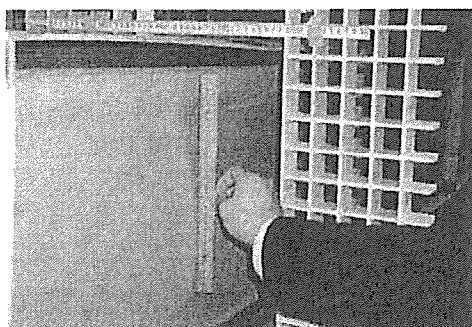
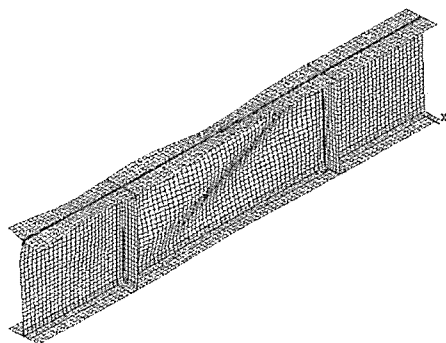


Fig.4 Relationship bending strain and load of 4-point bending test



(a) Experimental result



(b) FEM result

Fig.5 Buckling mode shape

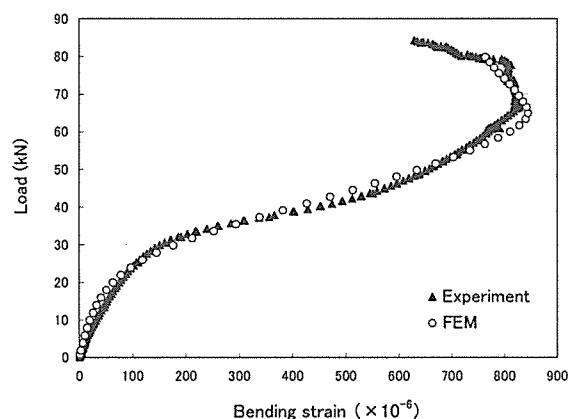


Fig.6 Bending strain on the center of Web

5. 結 言

本研究では, 歩道橋に適用するFRP製の主桁を製品例とし, 予め成形されたGFRPとCFRPをビルトアップする方法を提案し, 試設計, 試作, FEM解析および実験による性能評価を行なった. その結果, 以下の結論が得られた.

- (1) 本研究で採用した, 「道路橋示方書・同解説」に準拠した構造設計は, 材料の直交異方性を考慮した修正を行なうことで, 実用的な精度で FRP 橋梁の主桁の設計を進めることが可能である.
- (2) また, 均質化法により材料の異方性を算出し, 積層シェル要素を用いた幾何学的非線形 FEM 解析は, 座屈後の実際の主桁のひずみを精度よく評価できる.
- (3) 予め成形された GFRP と CFRP をビルトアップする方法でも, 接着面での接合が十分であれば, 一体成形品と同等に試設計が可能で, 座屈後もはく離や亀裂の進展等の現象がない信頼性の高い成形品が得られる.

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.

<参考文献>

- 1) 道路橋示方書(I 共通編・II 鋼橋編)・同解説, (社)日本道路協会, 2003
- 2) 福田 博, 邊 吾一: 複合材料の力学序説, (株)古今書院, 1997
- 3) 日本複合材料学会: 複合材料ハンドブック, 日刊工業新聞社, 1989
- 4) 林 毅: 複合材料工学, 日科技連, 1971
- 5) 関谷 壮, 浜田 実, 角 誠之助: 平板構造強度設計便覧, 朝倉書店, 1982
- 6) 小野木重治: 高分子と複合材料の力学的性質, (株)化学同人, 1995