

連続引抜成形 FRP 箱形断面部材の振動特性評価

Vibration Characteristic Estimations for Box-Shaped Pultruded Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites

関根 孝次*, 岩松 智昭**, 伊藤 一平***, 小岩 正秀**, 山田 聖志****

Koji Sekine, Tomoaki Iwamatsu, Ippei Itoh, Masahide Koiwa, Seishi Yamada

*工博, 一関工業高等専門学校准教授, 機械工学科 (〒021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨)

**一関工業高等専門学校, 専攻科生産工学専攻 (〒021-8511 岩手県一関市萩荘字高梨)

***現 東北リコー(株) (〒989-1695 宮城県柴田郡柴田町)

****工博, 豊橋技術科学大学教授, 工学部建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

The FRP composite which has a lightweight and durability is used as a truss component of a FRP footbridge. In order to use FRP composite further in the industrial fields, such as engineering works, machinery, and construction, the survey data of the vibration characteristic are required. In this research, experimental modal analysis using a hammering is applied to box-shaped FRP composite, and the vibration characteristics (natural frequency and mode) are clarified. Furthermore, the analytical estimation method using the general-purpose FEM (Finite element method) structural analysis tool is examined, and the dynamic characteristics of box-shaped FRP composite are identified from comparison with experimental data.

Key Words : box-shaped FRP composites, vibration characteristics, experimental modal analysis, FEM analysis

キーワード: 箱形FRP 複合材, 振動特性, 実験モード解析, 有限要素法解析

1. はじめに

近年, 機械的特性, 軽量性, 耐食性を有するプラスチック系複合材料は, 成形法や強化材の改良に伴い, 工業材料としての利用範囲の拡充が益々期待されている. 特にガラス繊維を用いた GFRP は, 軽量で高強度なことから, 各種構造材やスポーツ用具等に広く利用されている. 歩道橋のトラス部材としても利用されはじめた FRP 引抜成形材が土木・機械・建築などの産業分野で更なる普及を獲得するためには, その動特性に関する実測データが必要である. そこで, 本研究では, 連続引抜成形 FRP 箱形断面部材を対象として, 打撃ハンマを用いた打撃試験による実験モード解析を行い, モードパラメータ (固有振動数, 固有モード) を実測する. 更に, 汎用 FEM (有限要素法) 構造解析ツールを活用した理論モード解析についても検討し, 実験・理論モード解析による FRP 箱形部材のモードパラメータ同定を行う.

尚, 本研究は豊橋技術科学大学から平成 20 年度高専連携プロジェクト研究助成の支援を受けて実施された.

2. 試験方法および使用機器 (実験モード解析)

本報では, 打撃試験 (実験モード解析) により FRP 箱形部材のモードパラメータを実測した. 図-1 に打撃試験システムを示す. 打撃試験は, 測定対象物に加速度センサ (図-2) を取り付け, 打撃ハンマ (図-3) で対象物を打撃加振することにより, 打撃ハンマの加

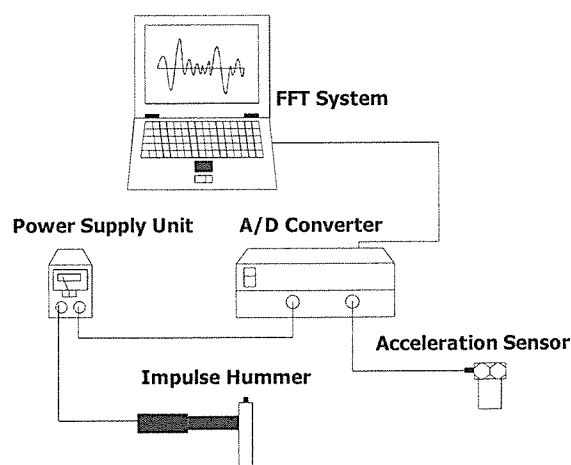


図-1 打撃試験システム

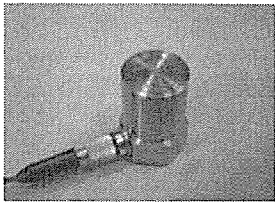


図-2 加速度センサ
(小野測器製 NP-3120)

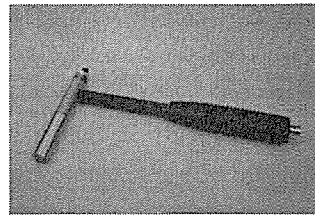


図-3 打撃ハンマ
(小野測器製 GK-3100)

振力信号と加速度センサからの応答加速度信号の2つの信号から、FFTアナライザにより周波数応答関数(固有振動数)を測定するものである。

また、得られた周波数応答関数をモーダル解析ソフトに読み込むことで、対象物のモーダル解析を行うことが可能である。打撃試験は、加振器を用いた定常加振試験に比べ、簡易的に試験を実施できるメリットがあるが、打撃操作が測定結果の精度に大きく影響するため、試験者の熟練度と経験が必要である。

部材の支持方法は、境界自由を実現させるよう FRP 部材の両端をゴムで吊るし(2点吊法)、加速度センサを両面テープで部材に固定している。

3. FRP 箱形断面部材

3.1 形状およびハンマ打撃点

部材のハンマ打撃面(A～D面、加速度センサを打撃面Aに貼付)および断面を図-4、5に示す。試験体は部材Ⅰ、ⅡおよびⅢの3種であり、断面の形状・寸法は同一である。部材の長手寸法、打撃点および加速度センサ位置を図-6～8に示す。

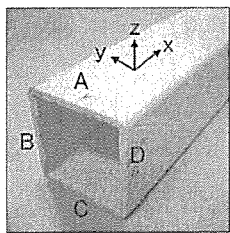


図-4 ハンマ打撃面(A～D)

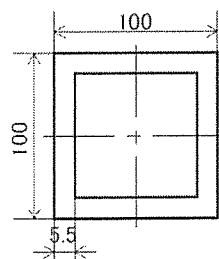


図-5 部材断面

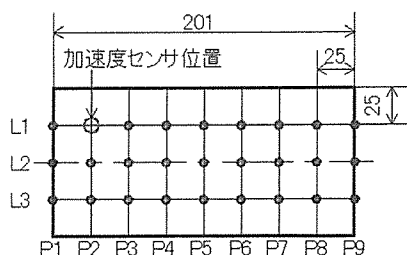


図-6 部材Ⅰ(A面、●打撃点、○加速度センサ位置)

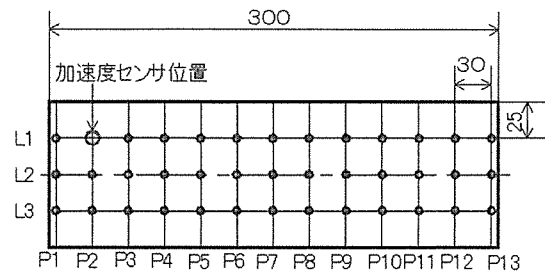


図-7 部材Ⅱ(A面、●打撃点、○加速度センサ位置)

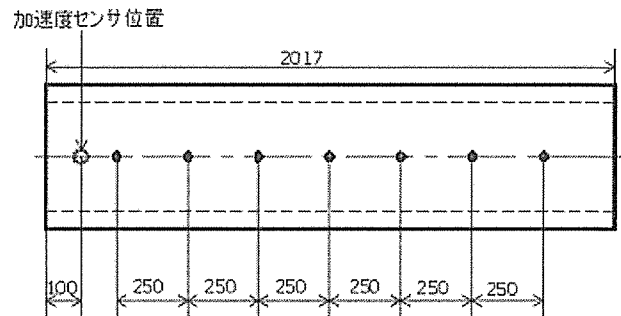


図-8 部材Ⅲ(A面、●打撃点、○加速度センサ位置)

3.2 積層構成¹⁾

図-9に部材の積層構成を示す。部材はEガラス製の連続繊維材を長手方向に配列した繊維層(1)とEガラス長繊維をランダム配置してマット状にしたストランドマット層(2)から成る積層構造である。内外両表面はポリエステル不織布(3)で整形され、(1)～(3)全層を不飽和ポリエステル樹脂で固着している。

3.3 機械的特性¹⁾

FRP箱形部材の機械的特性を表-1に示す。異方性比は約1.9であり、繊維体積含有率は33.5%である。

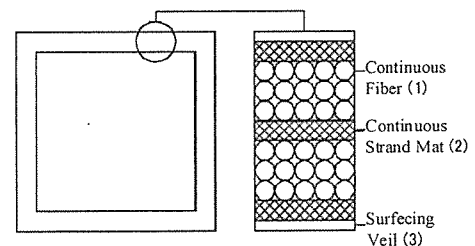


図-9 積層構成(部材断面)

表-1 FRP箱形部材の機械的特性

繊維方向縦弾性係数 E_x [GPa]	22.06
繊維直角方向縦弾性係数 E_y [GPa]	11.46
ポアソン比 ν_x	0.26
ポアソン比 ν_y	0.135
せん断弾性係数 G_{xy} [GPa]	4.021
質量密度 ρ [kg/m ³]	1532

4. 汎用有限要素法構造解析ツールの活用（理論モード解析）

FRP 箱形部材のモードパラメータに関する解析的評価を行うため、3次元CAD/CAEシステム（SolidWorks / COSMOSWorks）を活用し、FRP部材のモデリングおよび固有値解析（理論モード解析）を行った。COSMOSWorksは汎用FEM構造解析ツールであり、等方性材料のみならず、異方性（複合）材料から構成される構造物の解析が可能である。当解析ツールは試験結果と同様、FRP部材のモードパラメータ同定の際に有効な参照データを提示する。

5. 試験および解析結果

本報で扱うFRP部材は積層材であり、図-4に示した部材断面（y-z面）は直交異方性を有するが、FEM解析においては部材断面を等方性（面外等方性）として扱っている。

5.1 部材Ⅰ

部材Ⅰの打撃試験とFEM解析による1～4次の固有振動数および固有モードを図-10に示す。

部材Ⅰは寸胴で重量が小さく、打撃試験による固有モードの検出には経験と技量を要する。

1次モードの断面は直交中心軸に対して逆対称形（Anti-symmetry）を呈するため、これをAモードと称する。断面が対称形（Symmetry）を呈する場合はSモードと称する。1次はAモードの1つ目であるので、A1モードと称する。2次はA2モード、3次はS1モード、4次はS2モードに分類される。したがって、4つの低次モードでは、初めに二つのAモードが現れ、続いて二つのSモードが現れている。この固有モードの出現パターンから、寸胴な部材Ⅰは断面の対角線を中心に潰れ易く、かつ、ねじれ易い部材であることが分かる。固有振動数については、解析に対して試験結果が12～20%程、低い値を示している。

5.2 部材Ⅱ

部材Ⅱの打撃試験とFEM解析による1～5次の固有振動数および固有モードを図-11に示す。

1～4次では、部材Ⅰと同じモードパターンを示す。1次はA1モード、2次はA2モード、3次はS1モード、4次はS2モード、5次はS3モードを呈する。モードの順序をみると、部材Ⅰと同様に二つのAモードが現れ、続いて三つのSモードが現れている。よって、部材Ⅱについても断面の対角線を中心に潰れ易く、ねじれ易い部材であると判断できる。固有振動数については、解析に対する試験結果が13～22%程低く現れる。

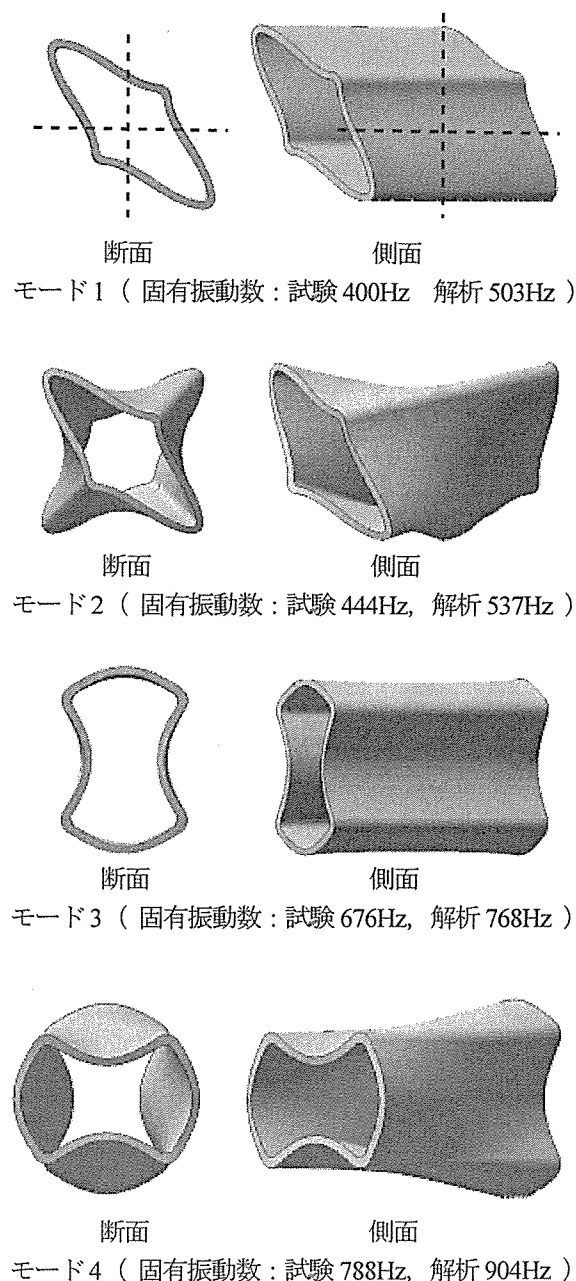


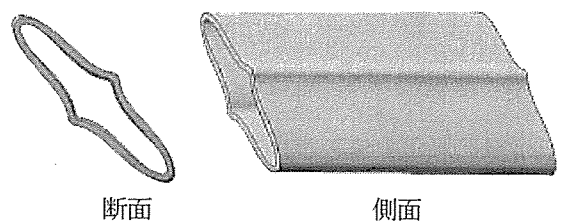
図-10 部材Ⅰの固有振動（打撃試験とFEM解析の比較）

5.3 部材Ⅲ

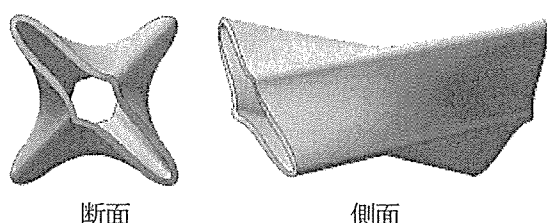
部材Ⅲの打撃試験とFEM解析による1～5次の固有振動数および固有モードを図-12に示す。

1次モードの側面をみると、梁の基本モードに酷似した形状を呈する。その断面をみると、Aモードを呈していることから、1次モードは純曲げではなく、ねじりを伴う曲げ変形モードであることが分かる。部材Ⅲのような細長部材は部材Ⅰ・Ⅱのような寸胴部材に比べて曲がり易く、箱形部材特有の曲がる際にねじれる性質（曲げ・ねじり連成）があり、この性質が固有モードにも現れている。また、1次モードはA1モードに分類されるが、部材Ⅰ、ⅡのA2モードに対応している。

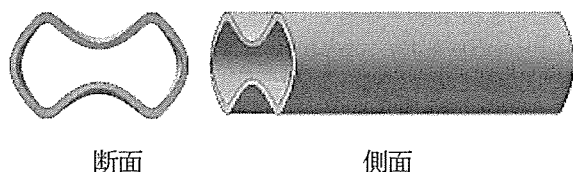
2および3次モードの側面をみると、梁の曲げモードに酷似した形状を呈する。断面はいずれもAモードを呈していることから、曲げ・ねじり連成モードであると判断できる。また、2次はA2モード、3次はA3モードに分類される。固有振動数については、解析に対する試験結果が2~7%程、低い値を示す。



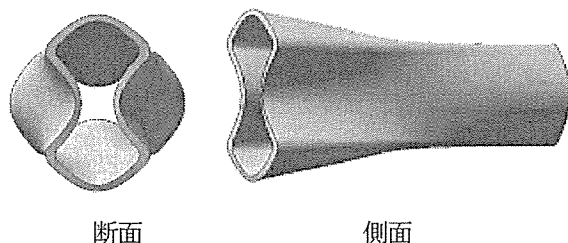
モード1（固有振動数：試験 394Hz 解析 503Hz）



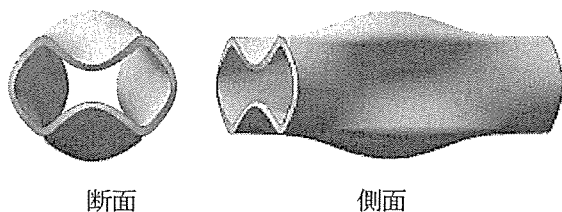
モード2（固有振動数：試験 415Hz, 解析 529Hz）



モード3（固有振動数：試験 668Hz, 解析 770Hz）

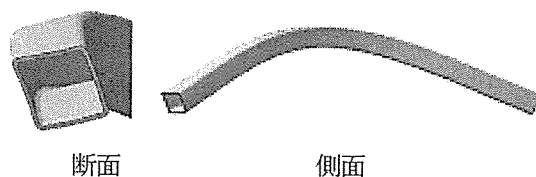


モード4（固有振動数：試験 719Hz, 解析 883Hz）

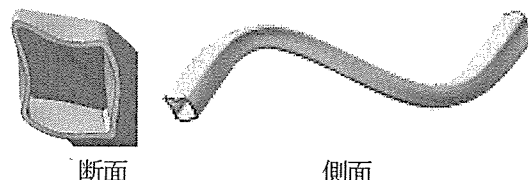


モード5（固有振動数：試験 904Hz, 解析 1050Hz）

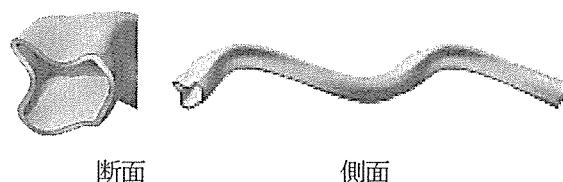
図-11 部材Ⅱの固有振動（打撃試験およびFEM解析の比較）



モード1（固有振動数：試験 120Hz, 解析 123Hz）



モード2（固有振動数：試験 302Hz, 解析 314Hz）



モード3（固有振動数：試験 514Hz, 解析 552Hz）

図-12 部材Ⅲの固有振動（打撃試験およびFEM解析の比較）

6. 結論

本研究では、打撃試験およびFEM解析による連続引抜成形FRP箱形断面部材の固有振動特性（モードパラメータ）同定を実施し、以下の事項を明らかにした。

- 1) FRP箱形部材はその断面形状特性と断面のせん断剛性が長手方向の伸縮剛性に対して小さいことから、低次の固有振動において曲げ・ねじれ連成モードが生じる。
- 2) 解析では、直交異方性を有する部材断面を面外等方性（縦弾性係数 $E_Y=E_Z$ ）として扱った。断面の積層構成から判断して、 $E_Y>E_Z$ の関係が推測され、 E_Z の値が解析結果に大きく影響すると予想される。試行的に E_Y よりも低い E_Z を使用して解析したところ、固有振動数は試験結果と良い一致を示した。
- 3) 寸胴部材の方が細長部材よりも試験と解析結果の差異が大きい。よって、寸胴な部材ほど固有振動において、ねじれ変形が支配的であり、それに伴う断面のせん断変形（潰れ）が大きいいため、断面における弾性特性（直交異方性）を精度よく解析モデルに反映させることが重要である。

参考文献

- 1) 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, No.518, pp.49-56, 1999