

CFRP 部品の曲げ・ねじり非線形振動解析

Non-linear Vibration Analysis in Bending and Torsion for CFRP Part

精密工学専攻 9号 大和田 舜

Shun Owada

ある。なお、同じ寸法のアルミでは入力を変化しても線形応答を示した。

1. はじめに

近年の自動車部品は、燃費の向上や製品の軽量化やコスト削減が重要視されている。そのため、金属より軽量かつ丈夫なアルミニウムや炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : 以下 CFRP) が多く用いられている。CFRP などに代表される複合材料は比強度や比弾性率の値が金属に比べて非常に高い。さらに CFRP は、繊維と樹脂フィルムからなる構造物を何層かに積み重ねて成形される。この積層の方向によって性質の異なる異方性を有している。異方性を有している複合材料は、繊維を同一方向に並べることで、特定方向の強さを強調した一方向強化材や、複合の構造をバランスよく整えることでどの方向に引っ張っても弾性率が同じになるような擬似等方性などさまざまな性質を持たせることができる⁽¹⁾。

しかし、CFRP に代表される異方性を有する複合材料は入力の変化に対して応答が非線形的に変動してしまうという問題がある。この問題が、実際に CFRP 製品を使用している人の感覚に普段とは違う影響を与えていると言われている。そこで本研究では、車体のねじり剛性を補強するストラットタワーバー (以下: タワーバー) という CFRP 製自動車部品を用いた評価を行い、使用者が普段とは違う感覚でどのような影響を受けるのかを実験と解析から提案する。

2. 方針

本研究では始めに、タワーバーを用いて CFRP の振動特性を実験モデル⁽²⁾により把握する。そしてタワーバーの弾性係数を材料力学の計算式を用いて算出し、解析モデルに当てはめ、実験との合わせこみを行う。

次に実機近似モデルを作成し、ハンドリングを模擬した加振を行う。この実験の結果から実際のハンドリング時に使用者が感じる応答を定量的に判断することが出来る。

最後に、CFRP の弾性係数を変化させた際のハンドリングの応答とその時にモデルにかかる入力を解析により算出し、実際に実機を用いて評価をする。

3. ストラットタワーバー単体の振動特性把握と非線形解析

3.1 ストラットタワーバー単体の特性把握

測定点及び実験セットアップを Fig. 1 に示す。本実験では、Z 軸の曲げ加振と Y 軸を中心としたねじり加振を行う。拘束条件は、片端を実機と同じようにボルトで固定拘束をする。入力には動電型加振器によるアップチャープ波を使用し、0~256Hz (曲げ加振) および 100~1024Hz (ねじり加振) を用いた。さらに、入力の大きさは実験ソフトウェア側の電圧で制御され、1V, 2V, 3V と変化させ、応答の比較を行う。応答には三軸加速度ピックアップを用い、X 軸および Z 軸で一度に応答を測定した。

曲げの実験結果を Fig. 2 に、ねじりの実験結果を Fig. 3 に示す。曲げおよびねじりの実験結果共に入力を大きくした際に、ピークのある周波数が下がり、ピーク自体も下がることが分かる。この周波数特性の傾向が、振動における非線形特性であり、使用者の感覚に影響を与えるもので



Length:1090[mm]
Outer diameter:20[mm] inside diameter:16[mm]

Fig. 1 Measurement point and set up for Tower bar

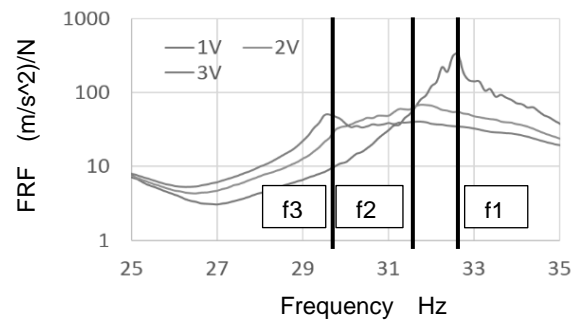


Fig. 2 CFRP bending FRF(Z direction)

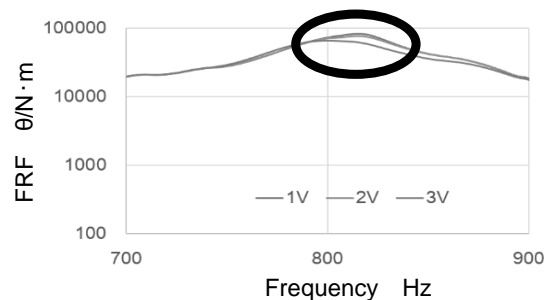


Fig. 3 CFRP torsion FRF(X direction)

3.2 タワーバーの持つ弾性係数導出

次に先に得られた実験結果からタワーバーの持つ弾性係数を求める。計算式は以下の通りである⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$f = \frac{1}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

$$E = \frac{4f^2 \pi^2 L^4 \rho A}{I} \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{TL}{GI_p} \quad (4)$$

f:周波数[Hz], L:長さ[m], E:縦弾性係数[Pa], I:断面二次モーメント[m⁴], ρ:密度[kg/m³], A:断面積[m²], G:横弾性係数[Pa], ν:ポアソン比, φ:ねじり角[rad], I_p:断面二次極モーメント[m⁴]

上式を用いて算出した弾性係数を Fig. 4 に示す. 入力が大きくなるにつれ, 弾性係数が下がることが実験結果から分かった.

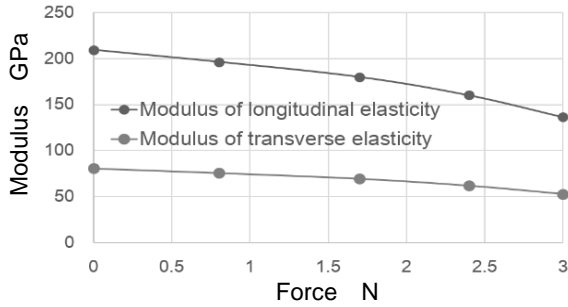


Fig. 4 Elastic modulus(CFRP)

3.3 タワーバーの非線形解析

タワーバーに対して非線形解析を行うことによって, 実験結果と解析結果の合わせこみを行う. 解析モデルは Fig. 1 のものと同じものを作成し, 入力波形も実験と同様のものを用いている. 拘束条件や測定点及び入力点も実験と同様の位置で行う.

解析手法としては, 非線形過渡応答解析を用いた. この解析手法は直接時間積分を用いており, 非線形解析という名目をしているが, 線形材料に対しても適用できる. この解析は時間軸入力波形を指定した時間間隔 Δt 毎で区切り計算をすることで, 時々刻々と変化する時間軸の入力が分かる. その入力時の弾性係数を指定することで解析が可能となる. 今回では, Δt を 0.001[sec] と設定し, 0 秒から 8 秒までの時間計算を行った.

実験での時間軸結果を Fig. 5 に, 解析での時間軸結果を Fig. 6 に示す. 縦軸のスケールやピークが生じている場所の概略が合致しているため, 今後の解析では今回用いたモデルと同様の構造を持つモデルを用いる.

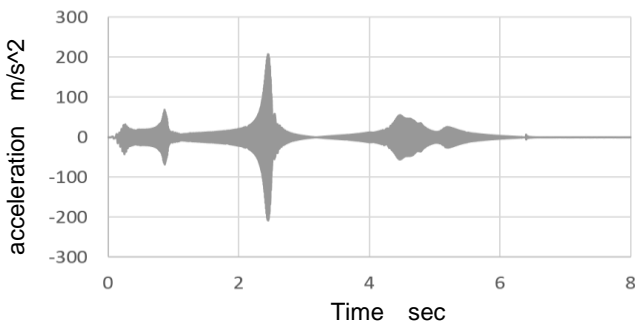


Fig. 5 Acceleration response (CFRP, bending Z, experiment)

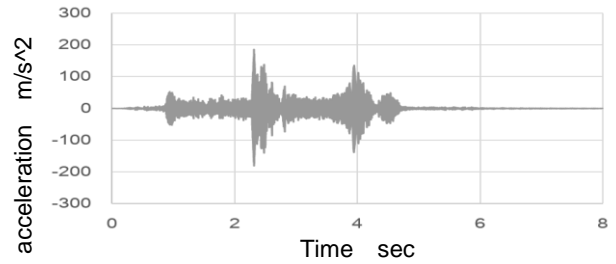


Fig. 6 Acceleration response (CFRP, bending, analysis)

4. 実機近似モデルを用いた振動試験

4.1 実機近似モデル概要

今後の研究で用いるために, Fig. 7 のようなタワーバーを取り付けることができる実機近似モデルを作成した. 材料はアルミニウム, 厚さは 2[mm], 底面の長さは 1090[mm], 側面は 400*400[mm] の正方形となっている.

この実機近似モデルのハンドル部分とタワーバー部分にそれぞれ応答点を設け, 加振を行い, このモデルの特性を確認する.

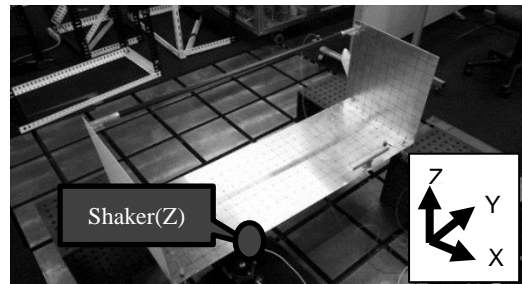


Fig. 7 Experiment setup for body model

4.2 ハンドリングを模擬した振動試験

ハンドルを切る際の挙動を模擬した加振を行い, タワーバーおよびハンドルの応答を測定する. 入力には Fig. 8 にあるようなインパルス波形を用いる. この波形は車線を変更したとき (28N), 普通に変更したとき (18N), ゆっくり変更したとき (8N) を模擬した入力である. 拘束は底面を四箇所ボルトで固定している.

ハンドル部分における応答点および実験結果を Fig. 9 に示す. この実験結果より, 線形材料のアルミニウム車体の応答を測定したにも関わらず, 非線形性を有する CFRP 部品の影響を受けて, 非線形特性が生じていることが分かる. この微妙な周波数の変化が使用者にどのくらいの影響を与えるのかを後に検討していく.

最後に代表的なタワーバーがねじれているモードシェイプを Fig. 10 に示す.

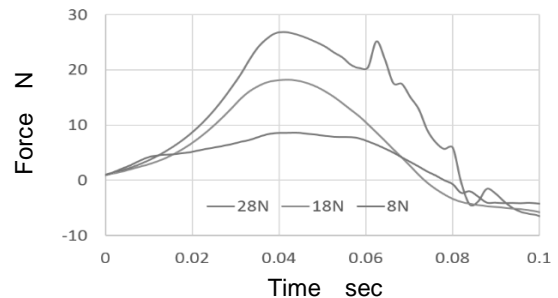


Fig. 8 Experiment input waveform (time)

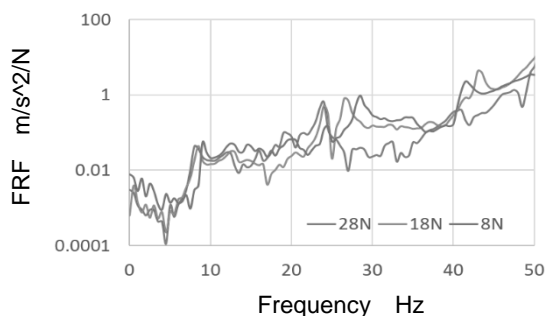


Fig. 9 Handle FRF(Z direction)

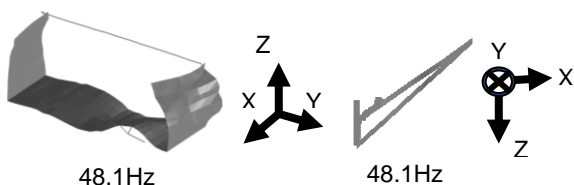


Fig. 10 Mode shape

5. 近似モデルを用いた非線形解析

5.1 ハンドリングを模擬した解析

解析により、CFRP 製タワーバーの弾性係数を変更させた場合の結果を実機近似モデルで再現できるように、実験と解析の合わせこみを行う。Fig. 11 に近似 FE モデルを示す。モデルの寸法および板厚は Fig. 7 のセットアップと同様である。拘束も実験と同様に底面を四箇所固定し、入力と応答点は Fig. 8, Fig. 9 と同様のものを用いている。なお、解析は非線形過渡応答解析で行い、 Δt を 0.001[sec] と設定し、0 秒から 2 秒までの時間計算を行った。

解析結果を Fig. 12 に示す。この解析結果でも実験と同様の傾向を得ることが出来た。解析モデルにおいても、非線形性を有する部分が存在すると、線形性を持つ部分も非線形特性が生じてしまうことが分かる。

最後に実験と解析のモード信頼性評価 (Mode Assurance Criterion 以下:MAC) を Fig. 13 に示す。この MAC の結果を見ると低周波での結果が良いことが分かるので、低周波における解析結果は実験でも同様の結果を得ることが出来る。

これらの結果から、解析で弾性係数を自由に変更した際の低周波における結果を実験結果として扱うことができると考えられる。このことを用いた評価を次章で展開していく。

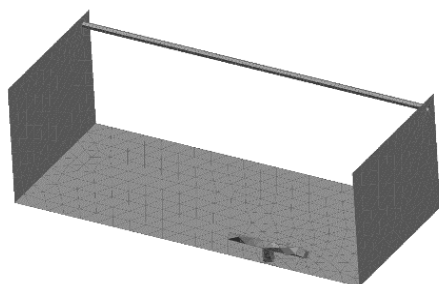


Fig. 11 FE model

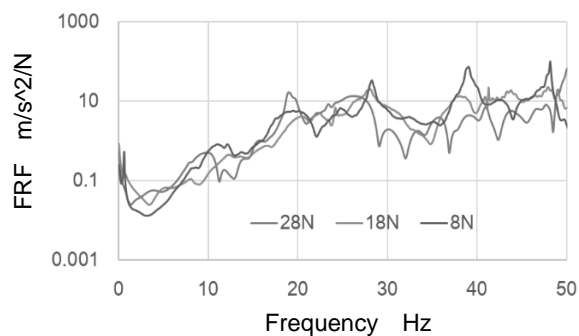


Fig. 12 Handle analysis result(CFRP,Z direction)

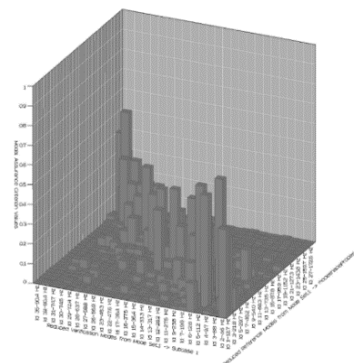


Fig. 13 MAC of experiment and analysis

6. 実機近似モデルを用いた評価試験

6.1 評価概要

入力を変動させた際の応答を、実際に実機近似モデルのハンドル部分を握ってもらい、感覚の違いを把握する。さらに CFRP の弾性係数を変化させた際にどの程度感覚が変わるのかを評価する。

変更させる弾性係数を Fig. 14 に示す。さらに、弾性係数を変化させない場合 (以下:Case.1)、弾性係数を両方下げた場合 (以下:Case.2)、縦弾性係数のみを下げた場合 (以下:Case.3)、横弾性係数のみを下げた場合 (以下:Case.4) に分類する。

本来ならば、変化させた弾性係数を持つ CFRP 製タワーバーが必要であるが、先程述べた通り、弾性係数を変更し解析をした結果を用いることで、実験においても同様の変更がなされたとみなすことができる。さらに、変更前の解析結果と比較し、入力波形を変更させることで、擬似的にハンドルに変更後の応答を与えることができる。このことを用いて感覚の違いについての評価を行う。

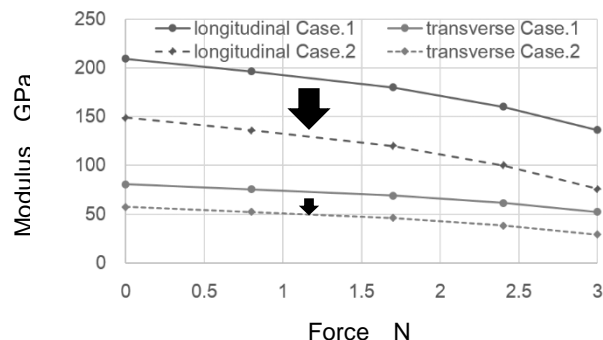


Fig. 14 Change of the elastic modulus(Case.2)

6.2 評価波形の作成方法

評価をする際の入力波形の変更方法を述べる。弾性係数を変更した際の解析結果を比較しながら Fig. 15 のようなプロセスを経て波形を変更している。

まず始めに、元の入力波形を高速フーリエ変換 (fast Fourier transform 以下:FFT) し、周波数軸の波形にする。次に解析結果の比較より、どの周波数帯をどの程度変化させるのかを決定する。FFT された周波数軸の入力波形に、その変化させる波形を掛け合わせるによって、弾性係数変更後の周波数軸入力波形を擬似的に作り出す。最後に逆高速フーリエ変換 (inverse fast Fourier transform 以下:IFFT) を行い時間軸入力波形に戻す⁽⁵⁾。

このプロセスを各Case. 2[~]4 に対しての場合に行うことで、擬似的な入力波形を算出する。

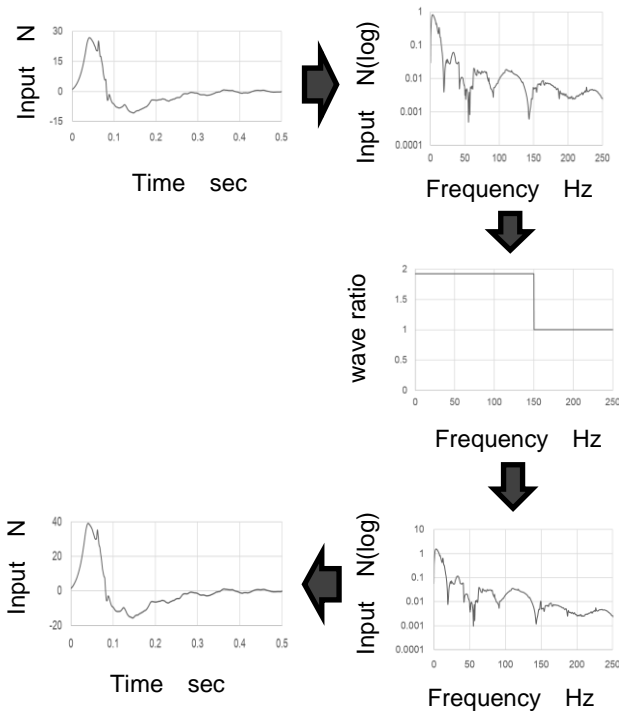


Fig. 15 Procedure of modification wave pattern

6.3 評価結果

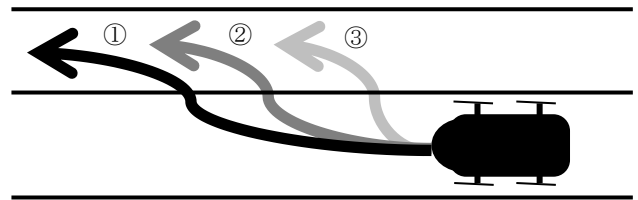
それぞれのケースにおける評価の結果を Fig. 16 に示す。上図の①②③はそれぞれ車線変更時のハンドリングとその時の入力を表す。なお、縦軸はアルミを基準としたときの応答が何倍に感じたかの強さを表す。

評価の結果を比較すると、Case. 1 と Case. 4 の結果が一致していることが分かる。そのため、本研究では横弾性係数のみを変化させても使用者は弾性係数変更前の製品と同じものだと感じるという結果が得られた。

次に、Case. 1 と Case. 2 について比較すると、Case. 2 の方が強い応答を示した。これは弾性係数を減少させた際に、ハンドルへの応答が強まった結果であると考えられる。

さらに、Case. 2 と Case. 3 について比較すると、Case. 3 の方がより強い応答を示した。

これら二つの比較から、縦弾性係数を変化させることで使用者には何らかの違いを与えることが出来るということが分かった。その際には、横弾性係数は変化させないほうがより大きな違いを使用者に与えることができ、より線形的な感覚に近づいていくことも分かった。



- ① Turn the steering wheel slowly(8N)
- ② Turn the steering wheel moderately(18N)
- ③ Turn the steering wheel fast(28N)

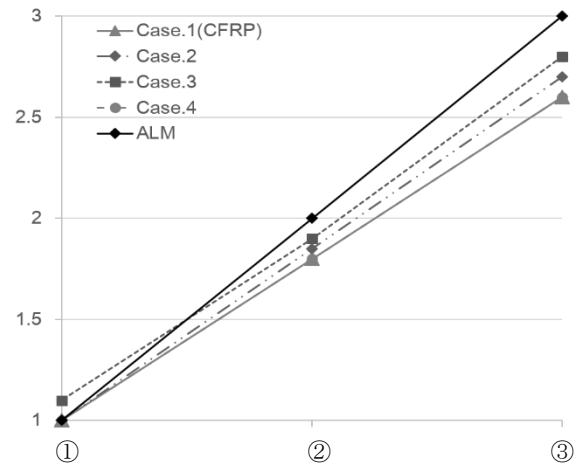


Fig. 16 Evaluation summary

7. 研究成果

- (1) 加振試験により、非線形性を有する複合材料の非線形特性を把握した。
- (2) 非線形過渡応答解析により、非線形性を有する複合材料の解析を行った。
- (3) 実機近似モデルを用いた評価試験により、縦弾性係数を変更することで使用者の感覚に影響を与えることを示した。

参考文献

- (1) 福田博, “複合材料力学入門 第1章 複合材料力学のための弾性学, 材料力学の基礎”, 日本複合材料学会誌, Vol. 22, No. 1, P19-25 (1996)
- (2) 大久保信行, “機械のモーダル・アナリシス”, 中央大学出版部 (1982)
- (3) 井上順吉, 他, “機械工学基礎講座 機械力学 I—線形実践振動論”, 理工学社 (2002)
- (4) 有信睦弘, 他, “JSME テキストシリーズ 材料力学”, 日本機械学会 (2007)
- (5) 長松昭男, “モード解析入門”, 株式会社コロナ社 (1993)