

FRP の振動解析技術

上田宏樹

技術開発本部・機械研究所

FRP Vibration Analysis

Hiroki Ueda

In this paper, a method to calculate the natural frequency and loss factor of Fiber Reinforced Plastics (FRP) is presented. It was assumed that the FRP vibration energy dissipation model could be presented by a mass-spring model, which was the tension of a resin fiber and shear spring matrix connected in series. This method proved to be sufficiently reliable for FRP vibration characteristics of predictions. As an application example, a boring bar made of high damping CFRP was used.

まえがき = 炭素繊維強化複合材を代表とする繊維強化複合材は、軽量、高剛性、高強度などの優れた特性により構造材料として多くの分野でもちいられるようになった。これにともない、繊維強化複合材をもちいた構造体の振動特性に関する研究が広くおこなわれている¹⁾²⁾。炭素繊維強化複合材は比剛性が高いためこれをもちいた構造物は固有振動数を高くとることができるが、減衰性は一般金属材料とくらべて必ずしも大きな値ではない。これに対し、繊維強化複合材と損失係数の大きな粘弾性材とを積層構造にするなどの繊維強化複合材の減衰性を向上するための研究が多くおこなわれている³⁾⁴⁾。

本研究では、複合型を含めた広義の制振材料の中で最も大きい損失係数を有する材料の一つである拘束型制振材と同様に、粘弾性体のせん断変形により曲げ振動のエネルギーを消散させる構造として、一方向繊維強化複合材のマトリックス樹脂に損失係数の大きな制振材をもちいた構造を提案し、このような繊維強化複合材の減衰性を計算精度を確保しつつ効率的に予測する手法について検討する。また、本解析手法の実施例として、高減衰性CFRPをもちいたボーリングバーを紹介する。

1. 解析手法

マトリックス樹脂に損失係数の大きな制振材をもちいた一方向繊維強化複合材の減衰特性を有限要素法によって計算するためには、エネルギー消散を受けも粘弾性体であるマトリックス樹脂の特性を考慮する必要がある。一般に減衰性を計算する方法として次の二つがある。

粘弾性材の剛性を損失係数をもちいた複素剛性で表現し、複素固有値解析をもちいて求める方法。

減衰を無視した実固有値解析をおこない、モードごとの歪みエネルギー分担率から全体の損失係数を求めるモード歪みエネルギー法⁵⁾。

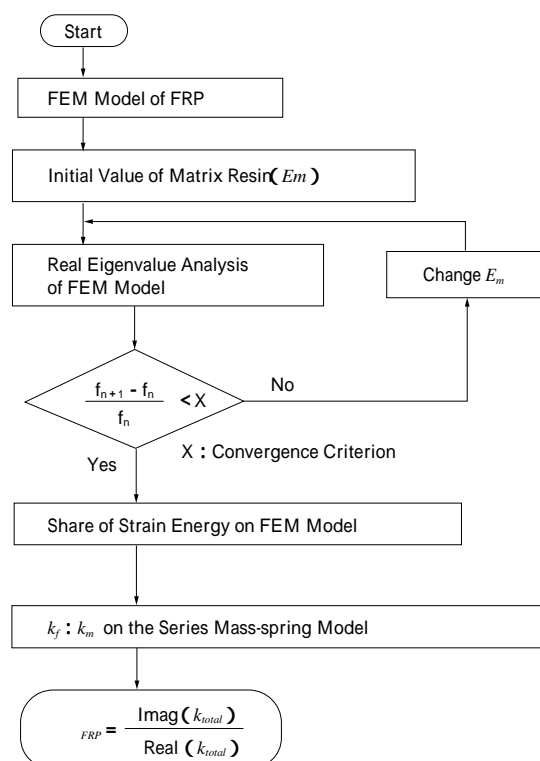
しかし、提案している一方向繊維強化複合材のような構造を対象とする場合には、の方法は計算自由度が大きくなるため実用不可能である。また、の方法は系に減衰を付加することによる振動モードの変化が考慮されていないため、マトリックス樹脂の損失係数が大きい場

合には計算精度が低下する問題がある。

本稿では繊維と樹脂による力学的異方性を考慮した等質な連続体として扱う方法をもちいる。また、計算精度を向上させることを目的として、一方向繊維強化複合材の梁としての曲げ剛性を等価な繊維と樹脂の直列ばねで表現できると仮定し、実固有値解析からえられる歪みエネルギー分担率をもちいて、そのばね定数を同定し、その結果に減衰を付加することによって全体系の減衰特性を求める手法を提案する。

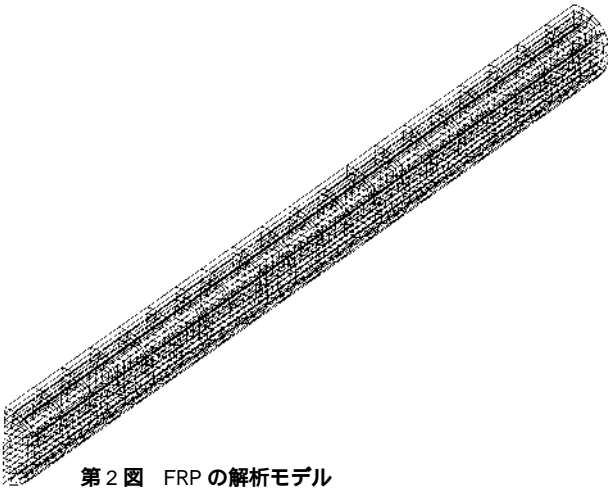
本手法の流れを第1図に示す。まず、第2図のように、梁状の長手方向に繊維強化されている一方向繊維強化複合材を等価な連続体として要素分割する。有限要素法にもちいる等価な要素の特性は式(1)に示す複合則⁶⁾をもちいて決定される。

ここで、繊維方向弾性率 E_L 、繊維方向ポアソン比 ν_L 、



第1図 解析の流れ

Fig. 1 Flow of analysis



第2図 FRPの解析モデル
Fig. 2 FEM model of FRP

繊維直角方向弾性率 E_T , 繊維直角方向ポアソン比 ν_T , 繊維方向せん断弾性率 G_{LT} , サブスクリプト f は繊維, m は樹脂を示し, V_f は繊維体積含有率を示している。なお, 繊維強化複合材の密度は式(2)から求められる。

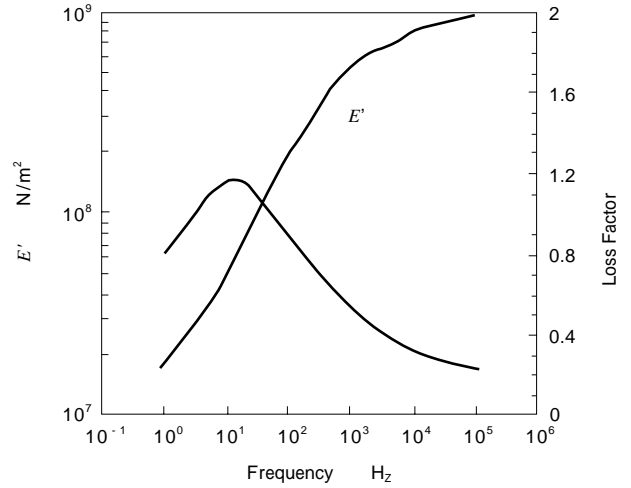
$$\left. \begin{aligned} E_L &= E_f V_f + E_m (1 - V_f) \\ \frac{1}{E_T} &= \frac{1.36 (K_f - K_m)}{(K_f - K_m)^2 - (V_f K_f - V_m K_m)^2} \\ &\quad + \frac{1 - 1.05 V_f}{E_m} \\ L &= \frac{1.05 V_f (K_f - K_m)}{K_f - K_m} + V_m \\ r &= L E_T / E_L \\ \frac{1}{G_{LT}} &= \frac{1.36}{G_f - G_m} + \frac{1 - 1.05 V_f}{G_m} \\ K_f &= E_f (1 - \nu_f^2), K_m = E_m / (1 - \nu_m^2) \\ G_f &= E_f / 2(1 + \nu_f), G_m = E_m / 2(1 + \nu_m) \\ \rho_{FRP} &= V_f \rho_f + V_m \rho_m \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho_{FRP} = V_f \rho_f + V_m \rho_m \dots \dots \dots (2)$$

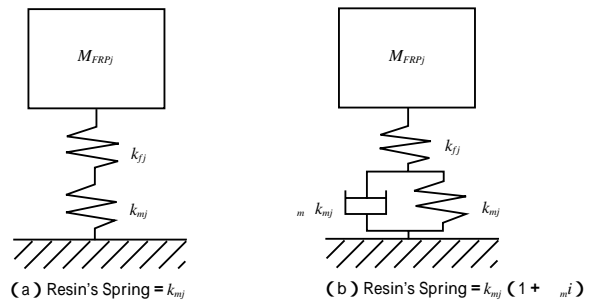
ここで, 制振樹脂は粘弾性体であるため樹脂剛性が複素数であり, 第3図に示すように樹脂剛性の実部である貯蔵弾性率および実部と虚部との比である損失係数ともに周波数依存性をもつ。ここでは, 樹脂剛性の実部のみにより計算した要素特性をもちいて実固有値解析をおこなう。また, 周波数依存性については収束計算をおこなうことにより考慮する。複合則をもちいた等価な有限要素モデルにおける実固有値解析により求めた歪みエネルギー分担率から等価な直列ばね系のばね定数を同定し, その等価な直列ばね系のうち, 等価な樹脂のばねに減衰を付加した場合の系全体の損失係数をモード変化を考慮して計算する。

ここで, 従来のモード歪みエネルギー法について説明する。モード歪みエネルギー法での損失係数は各要素の歪みエネルギー分担率に各要素の損失係数を乗じ, その総和で与えられる。したがって, 複合則でモデル化された一方向繊維強化複合材の損失係数は各要素の繊維強化方向に対し各方向の変形に対する歪みエネルギー分担率とそれらの損失係数を掛け合わせたものの総和からえられる。つまり, j 次モードの損失係数 μ_{FRPj} は次式で与えられる。

$$\mu_{FRPj} = \sum_e \left(\sum_{k,l} \frac{U_{kl}}{U_{total}} \mu_{kl} \right) \dots \dots \dots (3)$$



第3図 マトリックス樹脂の貯蔵弾性率 E' と損失係数
Fig. 3 E' and loss factor of matrix resin



第4図 等価直列ばねモデル
Fig. 4 Series mass-spring model

ここで, e は要素番号, k, l はモデルにおける方向, U_{kl} は各方向の歪みエネルギー, U_{total} は総歪みエネルギーを示しており, μ_{kl} は式(1)において樹脂の弾性率を複素剛性 $E_m(1 + i_m)$ としたときの繊維強化複合材各方向の損失係数を示している。また, i は虚数を示している。

これに対し, 本方法では固有値感度から歪みエネルギー分担率を求め, それらをもちいてモードごとに直列ばねの比率を同定する。そして, 制振材の減衰によるモード変化を考慮して損失係数を計算する。ここでは, はり全体の曲げ剛性が第4図(a)のように繊維の引っ張りばね k_{fj} と樹脂のせん断ばね k_{mj} からなる直列ばね系で表現できると仮定する。それらの関係は曲げ変形の波長により異なってくると考えられるので, ここでは各モードごとにその無次元歪みエネルギーの分担率から等価なばね定数の比率を同定する。

ここで, それらの比率は実固有値解析からえられる無次元歪みエネルギー分担率 μ_j をもちいて次式で与えられる。

$$\frac{k_{fj}}{k_{mj}} = \frac{\mu_j}{1 - \mu_j} = \dots \dots \dots (4)$$

つぎに, 制振樹脂の減衰を考慮するためせん断剛性の虚部 $i_m k_{mj}$ を第4図(b)のように加えると, 繊維強化複合材のばね k_{totalj} は次式の関係を満たす。

$$\frac{1}{k_{totalj}} = \frac{1}{k_{fj}} + \frac{1}{k_{mj}(1 + i_m)} \dots \dots \dots (5)$$

式(5)からえられる k_{totalj} は理論式であり, モード変化は自動的に考慮されていることになる。したがって,

式(4), 式(5)より繊維強化複合材の j 次モードの損失係数 $_{FRP}j$ は次式から求められる。

$$_{FRP}j = \frac{\text{Imag}(k_{totalj})}{\text{Real}(k_{totalj})} = \frac{j}{j + \frac{2}{m} + 1} \dots\dots\dots (4)$$

2. 計算および実験結果

まず, 前章で述べた等価直列ばね法の妥当性を検証するために, 有限要素法から直接求めた固有振動数と等価直列ばね法から求められる固有振動数との比較をおこなった。

つぎに, 一方向繊維強化複合材で第2図に示した有限要素モデルと同じ梁状の構造物を製作し, その振動特性を測定するとともに, 提案した等価ばね法およびモード歪みエネルギー法による計算値との比較をおこない本手法の妥当性を検証した。

2.1 等価直列ばね法の検証

前章で提案した等価直列ばね法の妥当性を検証するために, 一方向繊維強化複合材モーダルマス M_{FRPj} , 繊維引っ張りばね k_{fj} の値は一定とし, 樹脂せん断ばねの実部 k_{mj} に変化を与え, 提案した第4図のモデルからえられる式(7)をもちいて求めた固有振動数と, 有限要素法から直接求めた固有振動数との比較をおこなった結果を第5図に示す。

$$k_{totalj} = \frac{k_{fj} \cdot k_{mj}}{k_{fj} + k_{mj}} \dots\dots\dots (7)$$

なお, 計算にもちいた梁構造物の長さは $l = 0.2\text{m}$, 直径は $d = 0.016\text{m}$ であり, 基準とした繊維および樹脂のパラメータは $E_f = 2.058 \times 10^{11}\text{N/m}^2$, $\nu_f = 0.2$, $E_m = 6.0 \times 10^8\text{N/m}^2$, $\nu_m = 0.5$ である。樹脂せん断バネ k_{mj} に変化を与えても, 有限要素法から求めた固有振動数と変動時のせん断ばね比から求めた固有振動数は良く一致しており, 等価直列ばね系に置き換えることは妥当であると考えられる。

2.2 梁状の一方向繊維強化複合材の実験と計算との比較検討

一方向繊維強化複合材の例として第1表に示すような諸元の梁状の構造物を製作し, その動特性の計測をおこなうとともに, 提案した等価ばね法およびモード歪み

第1表 FRPの諸元

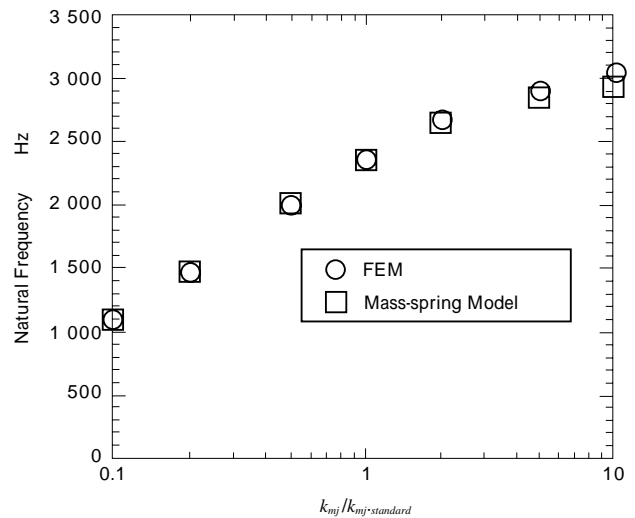
Table 1 Material description of FRP

Case	Material Properties
Case 1	$E_f = 2.058 \times 10^{11}\text{N/m}^2$, $\nu_f = 0.2$, $E_m = 6.0 \times 10^8\text{N/m}^2$, $\nu_m = 0.5$, $m = 0.43$, $_{FRP} = 1.401$
Case 2	$E_f = 7.252 \times 10^{10}\text{N/m}^2$, $\nu_f = 0.2$, $E_m = 5.5 \times 10^8\text{N/m}^2$, $\nu_m = 0.5$, $m = 0.45$, $_{FRP} = 1.874$

第2表 1次モードの固有振動数と損失係数

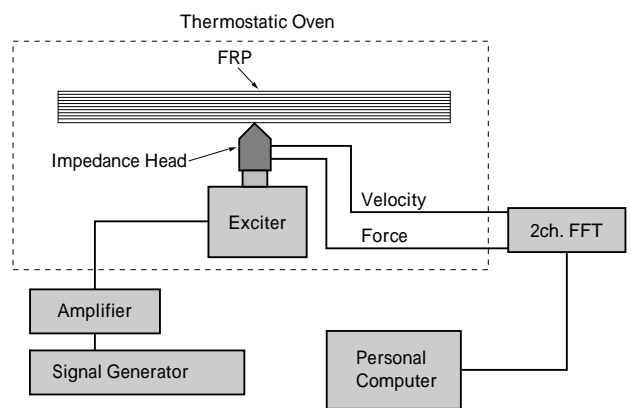
Table 2 Natural frequency and loss factor of 1st mode

	Natural Frequency		Strain Energy Share Ratio of Resin	k_m/k_f	Loss Factor		
	Calculation	Experiment			Mass-spring	MSE	Experiment
Case 1	2 219Hz	2 247Hz	0.415	1.410	0.161	0.190	0.166
Case 2	1 433	1 448	0.218	3.587	0.085	0.101	0.084



第5図 FEMと等価直列ばね法との比較

Fig. 5 Comparison between FEM and series mass-spring model

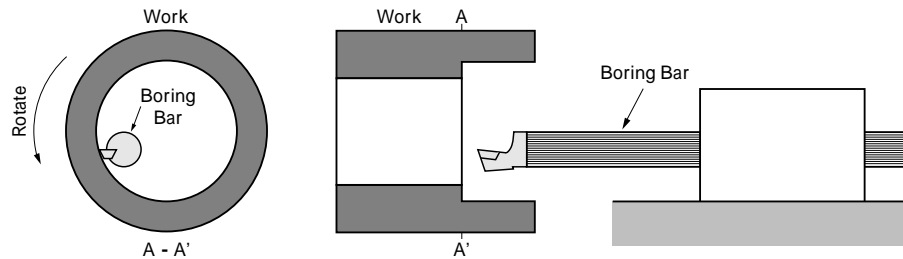


第6図 実験装置概念図

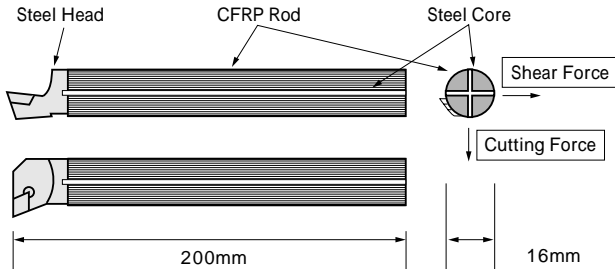
Fig. 6 Block diagram of experimental apparatus

エネルギー法 (MSE) による計算値との比較検討をおこなう。Case 1 は炭素繊維, Case 2 はガラス繊維を使用している。動特性の測定は第6図に示すように, インピーダンスヘッドを介して加振器に取り付けられた繊維強化複合材の棒状体を恒温槽内に設置し, 設定温度 (25) に保たれた状態で正弦波掃引加振することによっておこなった。加振力と加振点の振動加速度との伝達関数を求め, 共振点に対して半値幅法を適用し, 固有振動数と損失係数を求めた。曲げ1次モードに対する計算結果および測定結果を第2表に示す。モード歪みエネルギー法では損失係数が Case 1, Case 2 ともに実測値に比べやや高めになっているが, 等価ばね法では Case 1, Case 2 ともに実測値と良く一致しており, 本手法の妥当性が示された。

Case 1 では $k_m/k_f = 1.41$ とすることによって, 実験値で損失係数 0.166 という繊維強化プラスチックとして非



第7図 ボーリングバー
Fig. 7 Boring bar



第8図 高減衰性CFRP ボーリングバー
Fig. 8 High damping CFRP boring bar

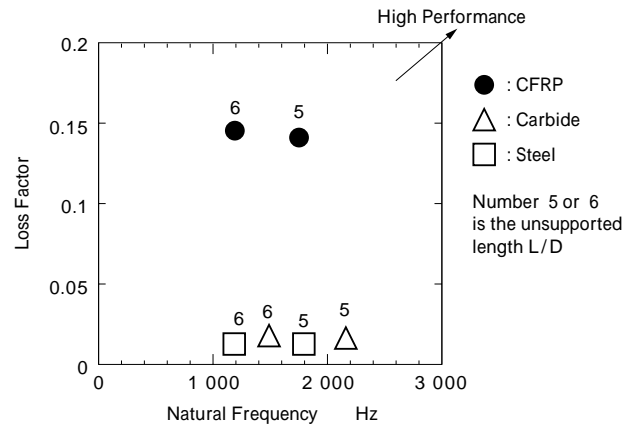
常に大きな損失係数がえられている。

3. CFRP 製ボーリングバー

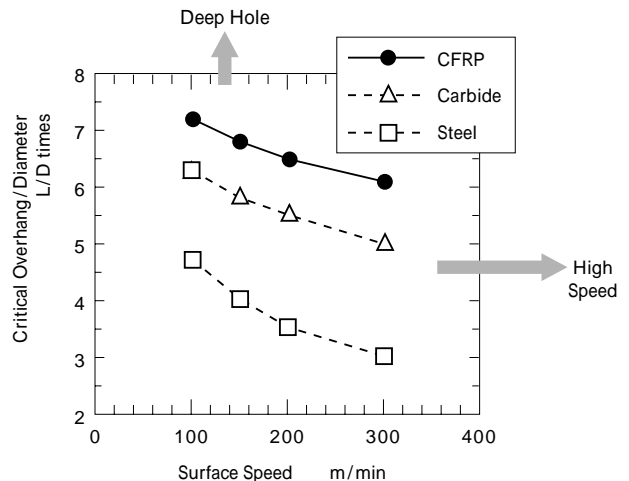
今回提案するFRPの振動解析方法をもちいて設計したCFRPを使用した例として、CFRP製ボーリングバーを紹介する。ボーリングバーは第7図に示すように、内面の切削加工をおこなうための工具で、その性能はボーリングバーの固有振動数と減衰性によって決まる。これに対し、前述した高減衰性CFRPをもちいたボーリングバーを開発した(第8図)。既存の鋼製、超合金製のボーリングバーと高減衰CFRPボーリングバーとの動特性の比較を第9図に示す。鋼製、超合金製に比べ同等の固有振動数を獲得して損失係数が大きいことがわかる。また、安定して切削できる限界深さの切削性能を第10図に示す。高減衰CFRPボーリングバーは切削速度が高い場合にも切り込み深さを大きくすることができる。

むすび=損失係数の大きい繊維強化複合材として、マトリックス樹脂を制振樹脂とした一方向繊維強化複合材を提案するとともに、複合則を適用した有限要素法をもちいてその減衰特性を精度を低下させることなく効率的に計算する手法について検討した結果以下の結論をえた。

- 1) 梁状の一方向繊維強化複合材において、制振樹脂をマトリックス樹脂とすることによって、一方向繊維強化複合材全体の損失係数を従来実現できなかったレベルである0.166にすることが可能であることを実証した。
- 2) 繊維強化複合材による大規模な構造物に対し、本手法をもちいることによって非常に容易に精度良い減衰性の予測が可能となった。



第9図 ボーリングバーの動特性
Fig. 9 Dynamic property of boring bar



第10図 切削性能
Fig. 10 Cutting performance

参考文献

- 1) 山田 元ほか: 機構論, 930-42B (1993), p.361.
- 2) R. D. Adams et al.: J. Composite Materials, 7(1973), p.402.
- 3) L. j. Pulgrano et al.: 28th National SAMPE Symposium (1983), p.56.
- 4) 藤本 淳ほか: 日本複合材料学会誌, Vol.20, No.4(1994), p.144.
- 5) C. D. Johnson et al.: AIAA Journal, Vol.20, No.9(1981), p.17.
- 6) 植村益次ほか: 東大宇宙航空研報告, Vol.12, No.4A(1976), p.815.