

織物複合材料の振動減衰推定法に関する研究*

中西 康 雅^{*1}, 松 本 金 矢^{*1}
座 古 勝^{*2}, 倉 敷 哲 生^{*2}

Estimation Method of Damping Properties for Woven Fabric Composites

Yasumasa NAKANISHI^{*3}, Kin'ya MATSUMOTO,
Masaru ZAKO and Tetsusei KURASHIKI^{*3} Faculty of Education, Mie University,
1577 Kurima-Machiya, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

An estimation method of damping properties for woven fabric composite materials has been proposed. To obtain the material damping of woven fabric composites, the maximum strain energy and kinetic strain energy are calculated by finite element method based on the strain energy method. The proposed method has been applied to plain woven fabric composites plates and compared with experimental results to evaluate the validity of the method. It is recognized that the computational results have agreed well with the experimental ones. Next, the effect of the angle of fiber bundles on material damping properties of plain woven fabric composites has been investigated by proposed method. From these points of view, the proposed simulation method is very useful for the estimation of material damping properties.

Key Words: Vibration, Damping, Woven Fabric Composites, Strain Energy Method, Finite Element Method

1. 緒 言

強化繊維を織り構造とした織物複合材料は、従来の一方織維強化複合材料と比較して横方向強度や耐衝撃性に優れるといった利点を有していることから、航空・宇宙機器等の構造部材として利用されている。さらに織布特有の柔軟性により複雑な形状の成形も可能であり、部品点数や工数を少なくすることができるため、生産価格を低減することが可能で、一般構造部材への適用においても大きな利点となる。ところが、織り構造が力学的特性に及ぼす影響は十分明らかにされていないため、織物複合材料の利用に向け、織り構造のモデリング、弾性特性、損傷進展などの力学的特性評価に関する研究が行われている^{(1)~(4)}。

一方、繊維強化複合材料を一般構造材として用いるには、振動特性を把握することも重要であり、振動減衰に関する研究も行われてきたが、その多くは一方織維強化材に関するものであり、織物複合材料に関する研究はほとんど行われていないのが現状である^{(5)~(11)}。これは、織物複合材料は単純な曲げ変形時にも

内部では多軸応力場となり、エネルギーの消散現象である振動減衰の評価を困難にしているためであると考えられる。これに対し R.D.Adams は、織物複合材料を巨視的な観点から直交異方性理論に基づく数値計算モデルを提案し、減衰比を算出したが、振動試験結果との差が大きく、織り構造を考慮したモデル化が必要であることを報告している⁽¹²⁾。したがって、織物複合材料の減衰特性評価においては、繊維束の織り構造に起因するエネルギー消散を正しく評価することが重要であり、織り構造を考慮した数値計算モデルを確立する必要があると考える。

そこで、本研究では織物複合材料の減衰特性評価手法を確立することを目的とした。まず、ひずみエネルギー理論に基づき織物複合材料の振動減衰モデルを定式化した。また、繊維束の織り構造を詳細にモデル化するため、解析手法には有限要素法を用いた。そして、提案手法の有効性を検討するため、E-glass/Vinylester からなる平織物複合材料の振動試験を行い、提案手法と比較した。さらに繊維束配向方向が振動特性に及ぼす影響を検討した。

2. 織物複合材料の振動減衰解析法

高分子系織物複合材料の振動減衰モデルを、R.D.Adams らのひずみエネルギー理論⁽⁷⁾に基づき定式化

* 原稿受付 2005年9月22日。

^{*1} 正員, 三重大学教育学部(☎514-8507 津市栗真町屋町1577)。^{*2} 正員, 大阪大学大学院工学研究科(☎565-0871 吹田市山田丘2-1)。

E-mail: nakanisi@edu.mie-u.ac.jp

する。

複合材料構造物の第 n 次モードの減衰比 ζ^n は、振動する構造物全体の 1 周期の消散ひずみエネルギー ΔU^n と、そのときの最大ひずみエネルギー U^n より次式で定義される。

$$\zeta^n = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta U^n}{U^n} \quad (1)$$

高分子系織物複合材料は繊維束と樹脂からなり、繊維束はその強化形態から局所的に一方繊維強化材として近似可能であることが報告されており、直交異方性理論が適用できる⁽¹³⁾。また樹脂は等方性材料である。したがって、織物複合材料の最大ひずみエネルギー U^n は繊維束と樹脂それぞれの最大ひずみエネルギーの和として、次式で表すことができる。

$$U^n = \int_{V_f} \boldsymbol{\varepsilon}_f^{nT} \mathbf{D}_f \boldsymbol{\varepsilon}_f^n dV + \int_{V_m} \boldsymbol{\varepsilon}_m^{nT} \mathbf{D}_m \boldsymbol{\varepsilon}_m^n dV \quad (2)$$

ここで、添字 f 、 m はそれぞれ繊維束と樹脂を表し、 V は体積、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみベクトル、 \mathbf{D} は応力-ひずみ関係マトリックスを表す。

同様に、織物複合材料の消散ひずみエネルギー ΔU^n は、繊維束と樹脂それぞれの消散ひずみエネルギーの和により求められ、次式のようになる。

$$\Delta U^n = \int_{V_f} \boldsymbol{\varepsilon}_f^{nT} \boldsymbol{\psi}_f \mathbf{D}_f \boldsymbol{\varepsilon}_f^n dV + \int_{V_m} \boldsymbol{\varepsilon}_m^{nT} \boldsymbol{\psi}_m \mathbf{D}_m \boldsymbol{\varepsilon}_m^n dV \quad (3)$$

ただし $\boldsymbol{\psi}$ は材料座標系における減衰能マトリックスであり、 $\boldsymbol{\psi}_f$ は次式のように定義することができる。

$$\boldsymbol{\psi}_f = \begin{bmatrix} \psi_L & & & & & 0 \\ & \psi_T & & & & \\ & & \psi_Z & & & \\ & & & \psi_{TZ} & & \\ & & & & \psi_{ZL} & \\ 0 & & & & & \psi_{LT} \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここで ψ_L 、 ψ_T 、 ψ_Z は繊維束の各軸方向のひずみ

に関する減衰能であり、 ψ_{TZ} 、 ψ_{ZL} 、 ψ_{LT} は各座標面のせん断ひずみに関する減衰能である。ただし、繊維束は一方繊維強化材の集合とみなすことができることから、面外等方性を仮定し $\psi_T = \psi_Z$ 、 $\psi_{ZL} = \psi_{LT}$ の関係が成り立つ。また $\boldsymbol{\psi}_m$ は次式のようになる。

$$\boldsymbol{\psi}_m = \begin{bmatrix} \psi_x & & & & & 0 \\ & \psi_y & & & & \\ & & \psi_z & & & \\ & & & \psi_{yz} & & \\ & & & & \psi_{zx} & \\ 0 & & & & & \psi_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで ψ_x 、 ψ_y 、 ψ_z は樹脂の各軸方向のひずみに関する減衰能であり、 ψ_{yz} 、 ψ_{zx} 、 ψ_{xy} は各座標面のせん断ひずみに関する減衰能である。ただし、樹脂が等方性材料である場合には、 $\psi_x = \psi_y = \psi_z$ 、 $\psi_{yz} = \psi_{zx} = \psi_{xy}$ の関係が成り立つ。

3 平織物複合材料の振動特性評価

3.1 評価法の概要 2章で提案した減衰特性解析手法の有効性を検討するため、図1に示す E-glass/Vinylester からなる平織物複合材料の減衰特性を提案手法により求め、振動試験結果と比較する。

まず、繊維束と樹脂それぞれの力学的特性値を求める必要がある。繊維束は一方繊維強化材とみなすことができるため、繊維と樹脂単体の材料特性および繊維含有率から弾性係数を算出する。次に樹脂単体の減衰能を振動試験により求め、樹脂の減衰定数を同定し、繊維束部の繊維含有率をもとに繊維束の減衰能マトリックスを算出する。そして、平織材の繊維束形状測定結果をもとに有限要素モデルを作成し、織物複合材料全体の減衰特性解析を実施する。ただし、詳細な繊維束形状および繊維束間の樹脂をモデル化するため、有限要素に三次元六面体要素を用いた。最後に提案手法による平織材の解析結果と振動試験結果とを比較し、提案手法の妥当性を検証する。

3.2 力学的特性値の算出 強化繊維および樹脂の弾性特性と繊維含有率より、繊維束の弾性特性を求める。レーザー顕微鏡を用いて図2に示すような繊維束垂直断面の画像を撮影し、繊維束部の繊維体積含有率を求めた結果、繊維束における繊維体積含有率は45.0%であった。

表1のE-glass, Vinylesterそれぞれの弾性特性と、得られた繊維体積含有率から、繊維束を一方向繊維強化材とみなした力学的特性値を求めた。繊維方向の縦弾性係数は複合則により算出し、繊維直角方向縦弾性係数、せん断弾性係数およびポアソン比は植村・山脇の式⁽¹⁴⁾により算出した。表2に算出した繊維束の弾性特性を示す。なお、樹脂単体での弾性特性も併せて示す。

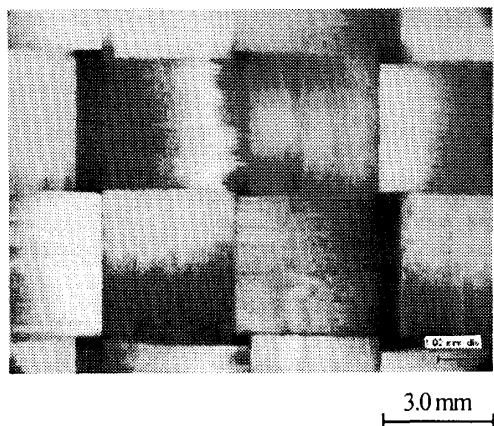


Fig.1 Image of E-glass plain woven fabric

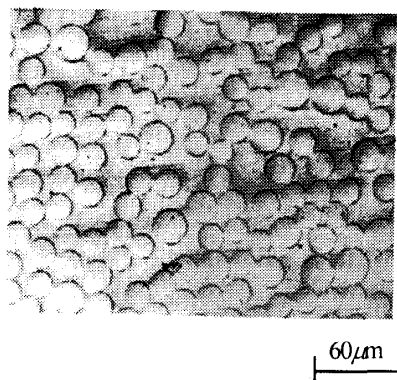


Fig.2 Image of cross section of fiber bundle of E-glass/Vinylester woven fabric composites

Table 1 Mechanical properties of fiber and matrix resin

	E-glass		Vinylester	
Young's modulus, GPa	E_f	77.6	E_m	3.30
Shear modulus, GPa	G_f	31.8	G_m	1.17
Poisson's ratios	ν_f	0.220	ν_m	0.350

Table 2 Mechanical properties of fiber bundle and matrix resin

	Fiber bundle (E-glass/Vinylester)		Matrix resin (Vinylester)	
Young's modulus, GPa	E_L	34.6	E_m	3.30
	E_T	8.94		
	E_Z	8.94		
Shear modulus, GPa	G_{TZ}	3.46	G_m	1.17
	G_{ZL}	3.33		
	G_{LT}	3.33		
Poisson's ratios	ν_{TZ}	0.291	ν_m	0.35
	ν_{ZL}	0.067		
	ν_{LT}	0.254		
SDC, %	ψ_L	0.479	ψ_x	9.40
	ψ_T	8.38		
	ψ_{TZ}	9.15	ψ_{xy}	10.8
	ψ_{LT}	8.72		

次に、樹脂単体の減衰能を振動試験より求めた。振動試験には、Vinylester からなる寸法 186 × 15.0 × 3.30mm の短冊状試験片を採用し、中央支持定常加振法により測定した。ただし、試験は空気の影響を取り除くため、40.0Pa の低真空中で行った⁽¹⁵⁾。また実験モード解析により固有振動数、モード減衰比を同定した。そして振動試験結果から、減衰定数同定法⁽¹⁶⁾により樹脂の減衰能マトリックスを同定した。ただし、Vinylester は等方性材料であることから、同定する減衰能を ψ_x, ψ_{xy} とした。同定結果を表2に示す。

続いて繊維束の減衰能を求める。繊維束は一方向繊維強化材とみなすことができることから、樹脂の減衰能 ψ_x, ψ_{xy} と繊維体積含有率 V_f を用いて減衰能を次式により算出した^{(12),(17)}。結果を表2に示す。ただし、 $G = G_f / G_m$ である。

$$\psi_L = \psi_x (1 - V_f) \frac{E_m}{E_f} \tag{6}$$

$$\psi_T = \psi_x \left(1 - \sqrt{V_f}\right) \frac{E_T}{E_m} \tag{7}$$

$$\psi_{LT} = \frac{\psi_{xy} (1 - V_f) \{(G + 1)^2 + V_f (G - 1)^2\}}{\{G(1 + V_f) + 1 - V_f\} \{G(1 - V_f) + 1 + V_f\}} \tag{8}$$

$$\psi_{TZ} = \psi_{xy} \left(1 - \sqrt{V_f}\right) \frac{G_{TZ}}{G_m} \tag{9}$$

3.3 有限要素モデルの作成 提案手法では、織物複合材料を繊維束と樹脂からなる不均質構造体と考え、織り構造を表現した有限要素モデルを使用する。この有限要素モデルの生成法に関しては、上辻らが提案した手法⁽¹³⁾を用いた。

図3に試験片から測定された繊維束位置と有限要素モデルとの比較を示す。また図4に試験片と有限要素モデルの断面画像を示す。これより、有限要素モデルは繊維束の織り構造を正確に表現できているものと考えられる。

3.4 平織物複合材料の振動解析 図5に示す E-glass/Vinylester からなる平織材の有限要素解析を実施し、中央加振試験結果と比較した。試験片の対称性から試験片の片側半分のみをモデル化することとし、寸法 $51.5 \times 11.7 \times 0.50$ mm の平織材の有限要素モデルを作成した。境界条件は片端を完全固定とした。また生成した有限要素モデルは、総節点数 20653、総要素数 17424、要素の最小長さは 0.0192 mm である。図6に有限要素解析により得られた繊維束配向角 $\theta = 0^\circ$ の振動モードを示す。

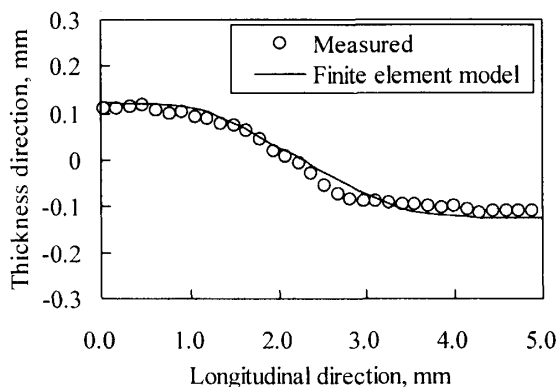


Fig.3 Comparison of fiber bundle shape between finite element model and measured value by laser microscope image

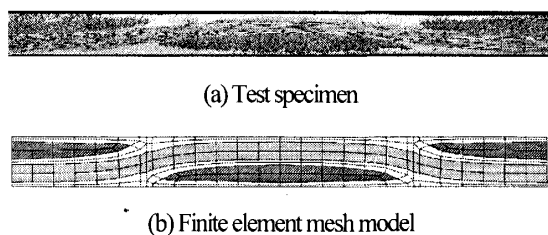


Fig.4 Comparison of cross section image of plain woven fabric composites

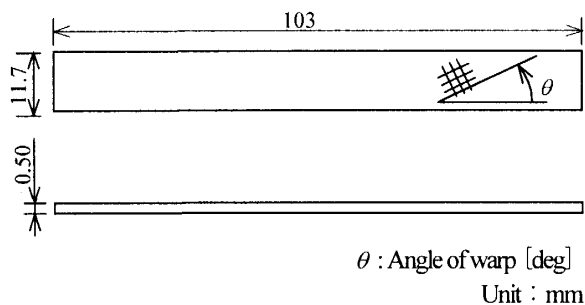


Fig.5 Dimensions of test specimen

次に、解析手法の妥当性を検証する目的で、繊維束配向角 0° の平織材の振動試験を実施し、固有振動数とモード減衰比を測定した。試験は空気の影響を取り除くため、空気の影響がほとんど無視できる 40.0 Pa 中で実施した。また振動試験法には、中央支持定常加振法を用いた。

図7に解析結果と振動試験結果の比較を示す。固有振動数に注目すると、誤差は最大でも 4.0% 以下であり、よく一致している。一方、減衰比は最大 18% の誤差があるものの、モードごとの傾向は試験結果と一致していることから、本解析手法は平織材の減衰特性を十分評価できているものと考えられる。

3.5 繊維束配向方向の影響 平織材の繊維束配向方向が振動特性に及ぼす影響を有限要素解析により検討する。繊維配向角を 0° から 90° まで 15° 刻みで変化させた有限要素モデルを作成し、実固有値解析と 2 章で示した提案手法により、1 次曲げモードの固有振動数とモード減衰比を求めた。

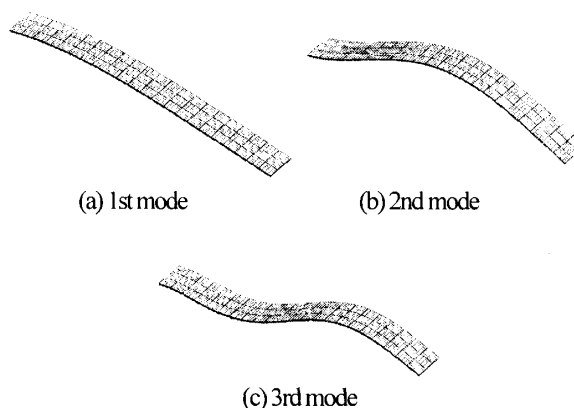


Fig.6 Vibration modes of plain woven fabric composites

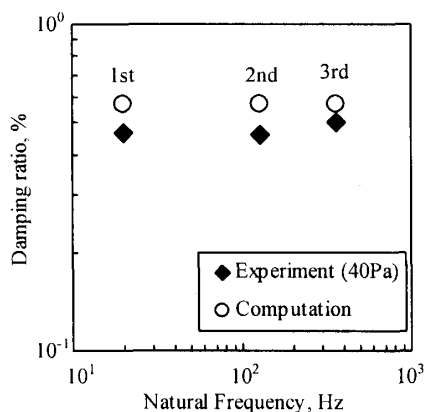


Fig.7 Comparison between experimental and computational results

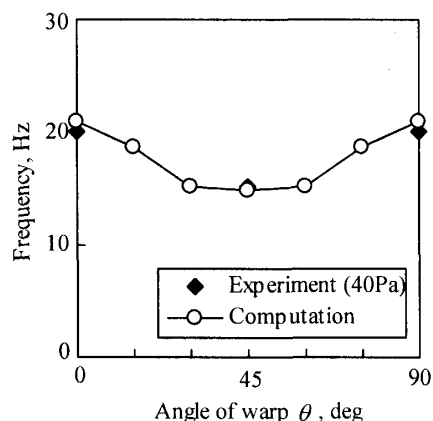


Fig.8 Relationship between natural frequency and fiber orientation

図 8, 9 に有限要素解析結果と振動試験結果の比較を示す。図 8 は配向角の変化に伴う 1 次固有振動数の変化を示したものである。解析結果と試験結果の誤差は最大でも 5%以下であり、よく一致している。図 9 は配向角の変化に伴う 1 次のモード減衰比の変化を示したものである。1 次のモード減衰比は繊維配向角が 0° から 45° まで増加し、 45° で最大値をとる傾向を示す。これは、繊維配向角 45° の平織材では繊維束がバイアス方向に配向されているため、曲げ変形時にも面内のせん断ひずみが発生するためであると考えられる。また解析結果と試験結果には最大 18%の誤差があるものの、比較的良い一致を示している。以上より、提案手法により平織材の繊維強化方向の影響を十分評価できているものと考えられる。

4. 結 言

織物複合材料の減衰特性解析手法を提案し、その妥当性を検討するため、E-glass と Vinylester からなる平織物複合材料に適用した。まず、一方向 GFRP, Vinylester それぞれの弾性係数、減衰定数を繊維含有率をもとに算出した。次に求めた物性値を用いて平織材の減衰特性解析を行い、振動試験結果と比較した。その結果、有限要素解析結果と試験結果は固有振動数、モード減衰比ともによく一致し、提案手法の有効性が明らかとなった。さらに平織材の繊維束配向方向が振動特性に及ぼす影響を検討した結果、固有振動数は繊維配向角が 0° , 90° で最大となるのに対し、減衰比は 45° で最大値をとることを明らかにした。また、振動試験結果との比較から、本提案手法が織物複合材料の減衰特性評価に有効であることが明らかとなった。

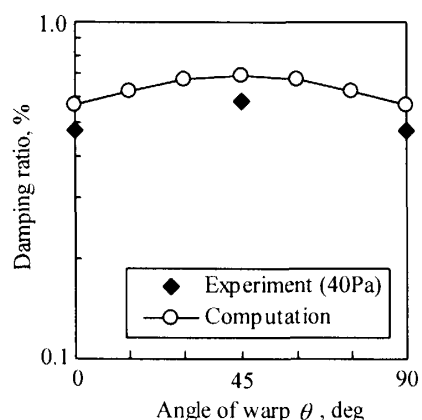


Fig.9 Relationship between damping ratio and fiber orientation

謝 辞

本研究の一部は文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号 17760553)の助成を受けて実施したものであることを記し、謝意を表す。

参考文献

- (1) S.V.Lomov, I.Verpoest, Modeling of the internal structure and deformability of textile reinforcements: WiseTex software, *Proceedings of ECCM-10*, (2002)
- (2) B.N.Cox, G.Flanagan, Handbook of Analytical Method for Textile Composites, *NASA Contractor Report 4750*, (1997)
- (3) Fujita, A. et al., Mechanical Properties of Textile Composites (2nd Report, Woven fabric composite), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.60, No.579 (1994), pp.2485-2491
- (4) Uetsuji, Y. et al., Effect of Mismatch of Stacking Phase on Damage Development of Plain Woven Fabric Composite Materials, *Journal of the Society of Materials Science*, 53 (2004), pp.403-409

- (5) A.B.Shultz, S.W.Tsai, Dynamic moduli and damping ratios in fibre reinforced composites, *Journal of Composite Materials*, 2, (1968), pp.368-379
- (6) R. Chandra, S. P. Singh, K. Gupta, Damping studies in fiber-reinforced composites - a review, *Composites Structures*, 46 (1999), pp.41-51
- (7) Lin, D. X., Ni, R. G. and Adams, R. D., Prediction and Measurement of the Vibrational Damping Parameters of Carbon and Glass Fibre-Reinforced Plastic Plates, *Journal of composite materials*, 18 (1984), pp.133-152.
- (8) Aoki, Y. et al., Damping Analysis and Experiment of Carbon Fiber/PEEK Laminates, *Journal of the Society of Materials Science*, 41, (1992), pp.1121-1125
- (9) Adachi, H., Hasegawa, T., Evaluation of Frequency and Temperature Characteristics on the Vibration Damping Properties of Unidirectional CFRP Materials, *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, 24-6, (1998), pp.230-237
- (10) Ueda, H., Inoue, Y., Vibration Analysis on FRP Considering Damping Effect, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64 No.619 (1998), pp.831-837
- (11) Ueda, H., Inoue, Y., Vibration Analysis on FRP Considering Damping Effect (Simple Calculation Method for Dynamic Design), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.647 (2000), pp.2115-2121
- (12) R.D.Adams, Damping Properties Analysis of Composites, *Composites (Engineered Materials Handbook Volume 1)*, (1984), pp.206-217
- (13) Uetsuji, Y., Zako, M., Damage Analysis of Woven Fabric Composite Materials, *Journal of the Society of Materials Science*, 48 (1999), 1029-1034
- (14) Hayashi, T., *Fukugouzairyou Kougaku (in Japanese)*, (1971), Nikkagirenn
- (15) Zako, M. et al., An influence of atmosphere on identification method of vibration damping parameters for fiber reinforced plastics, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.702 (2005), pp.386-391
- (16) Matsumoto, K., Identification method of vibrational damping parameters for Laminated Composite Materials, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.65, No.636 (1999), pp.3129-3134
- (17) D.A.Saravanos, C.C.Chamis, Unified micromechanics of damping for unidirectional and off axis fiber composites, *Journal of Composite Technology Research*, (1990), pp.31-40