

FRP 積層円筒の緩衝特性*

鮑力民^{*1}, 梅田大輔^{*2}
桜井正幸^{*1}, 劔持 潔^{*3}

Shock Absorbing Characteristic of Laminated FRP Cylinder

Limin BAO^{*4}, Daisuke UMEDA,
Masayuki SAKURAI and Kiyoshi KEMMOCHI^{*4} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

Development for introducing new material technology and new structural design technology in ski poles has been conducted in recent years. Although the CFRP pole is light, the impact is strong. The shock absorbing characteristic of the FRP is important for the application of robot arm and ski pole etc. In this work, the theoretical method was suggested about shock absorbing characteristic. An impact test apparatus was developed for verify the theory and this calculation method. The agreement obtained between the theoretical and the experimental values of seven types of laminated composite cylinders, these being unidirectional ($0^\circ, 90^\circ$) plies, cross-ply ($\pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ, \pm 75^\circ$) plies. It shows that the mathematical technique developed here is satisfactory for predicting the shock absorbing values (maximum impact load) of laminated composite cylinders. Shock absorbing characteristic of laminated composite cylinder varies with fiber orientation angle. Effect of E_L is large in near at 0° , and effect of G_{LT} is large in near at 45° about maximum impact load.

Key Words: Impact, Shock Absorbing Characteristic, Composite Laminated FRP Cylinder, Evaluation

1. 結 論

繊維強化複合材料 FRP は航空宇宙をはじめ船舶、自動車、スポーツ用品などの身近なものまで広い分野に適用されている。FRP はゴルフシャフト、ロボットアーム、自動車のプロペラシャフト等のように構造材料として用いられることが少なくないが、その場合には、引張り、曲げ、圧縮特性だけでなく緩衝特性も重要視される。その一例として、CFRP スキーポールをついた際、腕と肩にくる衝撃強さがポールの緩衝特性と Post-buckling 特性と大きく関連していることは報告されている⁽¹⁾。

これまでの複合材料における衝撃特性の研究は、衝撃破壊についての研究がおもに行われていた。武田⁽¹⁾ はシャルピーの曲げ試験による破壊評価、一軸圧縮衝撃試験による破壊評価、衝撃後の複合材料における力学特性の変化に関する研究について詳細に報告している。

複合材料の緩衝特性と関連している複合材料の振動

減衰特性の研究も広く行われている。Adams⁽²⁾ は減衰能を用いることで FRP 積層板の繊維配向角と曲げ減衰性能の関係を検討し、理論値と実験値のよい一致を得た。藤本ら⁽³⁾⁽⁴⁾ は CFRP の減衰特性を改善する手法として層間に制振フィルムを挿入した試験片の曲げ振動減衰特性を評価し、減衰特性では従来の CFRP より向上したことを実証した。また、著者ら⁽⁵⁾ はゴルフシャフト、ロボットアーム、自動車のプロペラシャフト等の構造材料として用いられる際、注目された複合材料のねじり減衰特性に対して、振動減衰能と FRP 積層理論を応用した FRP 積層円筒のねじり減衰計算法を提案し、振動減衰能と繊維配向角の関係を実験と数値計算で明らかにした。これらの研究による有意義な結果が複合材料の設計と応用で参考になっている。

構造材料の緩衝特性に関する研究は多く行われて、その成果は「振動工学ハンドブック」⁽⁶⁾ にまとめられていて、緩衝特性を利用した構造が各分野で応用されている。しかし、繊維強化複合材料の緩衝特性に関する研究は見当たらない。

本研究では FRP を円筒として用いる場合に多い材料形状の「アングルプライ積層円筒材」の緩衝特性に注目する。FRP 積層円筒に対して、衝撃緩衝特性を

* 原稿受付 2004 年 1 月 6 日。

^{*1} 正員, 信州大学繊維学部 (☎ 386-8567 上田市常田 3-15-1)。^{*2} 信州大学大学院工学研究科。^{*3} 信州大学繊維学部。

E-mail: baolimi@giptc.shinshu-u.ac.jp

明らかにするため、FRP アングラプライ積層円筒の衝撃緩和特性を測定する装置を作製し、FRP 材の緩衝特性と繊維配向角の関係を実験と理論で検証する。

2. FRP 積層円筒の緩衝理論

一方向材の FRP で作られた積層円筒のある層を取り出して、図 1 のように x 軸を円筒の軸と一致させると、その応力とひずみの関係は次のようになる⁽⁹⁾。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \cos \theta &= l, \quad \sin \theta = m \\ C_{11} &= Q_{11}l^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})l^2m^2 + Q_{22}m^4 \\ C_{12} &= Q_{12}(l^4 + m^4) + (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})l^2m^2 \\ &\dots\dots\dots \\ C_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})l^2m^2 + Q_{66}(l^4 + m^4) \\ Q_{11} &= \frac{E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}}, \quad Q_{22} = \frac{E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{TL}E_L}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} = \frac{\nu_{LT}E_T}{1 - \nu_{LT}\nu_{TL}} \\ Q_{66} &= G_{LT} \end{aligned}$$

ただし、 θ は繊維方向 L と x 軸とのなす角度で、 E_L 、 E_T 、 G_{LT} 、 ν_{LT} 、 ν_{TL} はそれぞれ L 方向のヤング率、 T 方向のヤング率、せん断剛性、 L 方向に引っ張ったとき T 方向の縮みの割合を示すポアソン比、 T 方向に引っ張ったとき L 方向の縮みの割合を示すポアソン比である。

対称積層板について、単位幅当たり作用する力を合力(stress resultant) N_x 、 N_y 、 N_{xy} とすると、合力とひずみの関係は次のようになる⁽⁹⁾。

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^n h_k \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{Bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

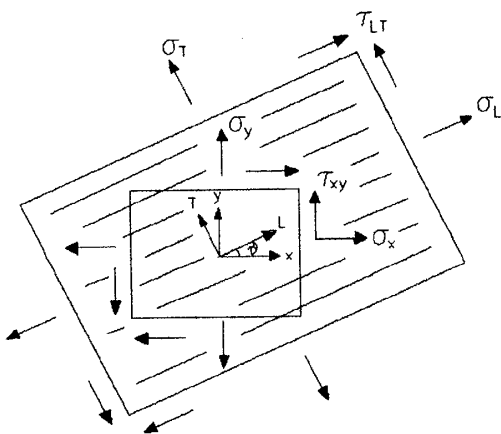


Fig. 1 Fiber co-ordinate system

$$= \begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $A_{ij} = \sum_{k=1}^n (h_k)(C_{ij})_k$ ($i, j=1, 2, 6$) で、 h_k は k 番目の層の厚さである。

図 2 に示したように質量 m のおもりとサンプルの FRP 円筒は一定な初速度 V_0 で剛体と衝突する。衝撃を受ける際、 $N_y = N_{xy} = 0$ より

$$N_x = A_{11}\epsilon_x + A_{12}\epsilon_y = \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right) \epsilon_x \dots\dots\dots (3)$$

になり、衝突する際の運動方程式は

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right) 2\pi r \cdot \frac{x}{1} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

で示すことができる。

ここで、 m はおもりの質量で、 c はサンプルのダンパの粘性係数、 r はパイプの半径、 l はパイプの長さである。式(4)の初期条件は $t=0: x=0, dx/dt = V_0$ とサンプルの粘性効果を考慮しない際、サンプルの変位 x と最大衝撃荷重 $Load_{max}$ は次のように与えられる。

$$x = \frac{V_0}{\omega} \cdot \sin(\omega t) \dots\dots\dots (5)$$

$Load = md^2x/dt^2$ より、

$$Load_{max} = V_0 m \omega = V_0 \sqrt{mk} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、パラメータは以下のとおりである。

$$k = \left(A_{11} - \frac{A_{12}^2}{A_{22}} \right) \cdot \frac{2\pi r}{1}, \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

サンプルの粘性効果を考慮する際、Runge-Kutta の数値解析法を用いて式(4)より、最大衝撃荷重 $Load_{max}$ を求める。

3. 実験方法と試料

理論式(6)の有効性を検証するために FRP 積層円筒の試験片を用いて緩衝特性を計測する。衝撃緩和性能実験装置は図 3 に示したように、試験片の上部に

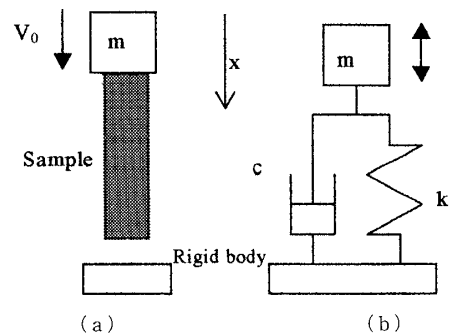


Fig. 2 Impact model

100 gのおもりを固定し、おもり上に加速度センサを取付けた。また、ひずみゲージを試験片の表・裏に2枚貼り付け、ひずみの平均をとる。おもりを取付けた試験片を一定の高さ(30 mm, 50 mm, 100 mm)に持ち上げ、レールに沿って落下させる。レールと試験片は、落下した際に分離する。おもりとサンプルが落下し、金属板と衝突する。衝突する際、加速度センサ(TEAC 608)・アンプ(TEAC SA-600)およびひずみゲージアンプ(KYOWA CDV-700 A)の出力をFFTアナライザ(ONO SOKKI CF-305 Z)に入力し衝撃加速度・ひずみと時間の関係を得て、最大衝撃荷重 $Load_{max}$ と最大ひずみ $Strain_{max}$ などを求める。本研究では最大ひずみ $Strain_{max}$ を確認用として使用した。サンプルの寸法は図4に示す。

図5はCFRP円筒において、高さ100 mm落下実験で加速度センサより換算した荷重-時間の測定曲線の一例である。図5(a)はサンプルの繊維配向角が0°で、図5(b)は30°である。その測定曲線より衝撃荷重の $Load_{max}$ を求める。他の各サンプルの実験結果も同じ傾向を示した。

理論予測に必要なFRP材の力学特性を引張、ねじ

り試験および振動減衰試験で測定する。

引張試験は島津(株)AG 20 kNDを用いて行った。0°材と90°材の中央部に軸方向と軸から90°方向にひずみゲージを裏と表に2枚貼る。0°材の結果より E_L と ν_{LT} を、90°材の結果より F_T と ν_{LT} を得る。実験のひずみ速度は0.05 sである。ねじり試験は島津(株)AG 20 kNDとCM 22-2028を用いて行った。純ねじり試験をするために1.0 Nの軸力制御を行う。45°の方向に付けたひずみゲージによりせん断ひずみ、試験機の荷重出力よりせん断弾性係数 G_{LT} を求める。実験のひずみ速度は0.01 sである。

振動減衰試験⁵⁾では、CFRPとAFRP試験片とも0°材を用い曲げ実験より Ψ_L (L方向の減衰能)を求め、90°材の曲げ実験より Ψ_T (T方向の減衰能)を求めた。そして0°・90°材のねじり実験の平均値を用いて Ψ_{LT} (LT方向の減衰能)を求めた。

試験片についての詳細を表1に示した。すべて5本サンプルの平均値である。

4. 実験結果と考察

4.1 理論と実験結果の比較 衝撃緩和性能実験装置で得られた衝撃加速度-時間の曲線より最大衝撃

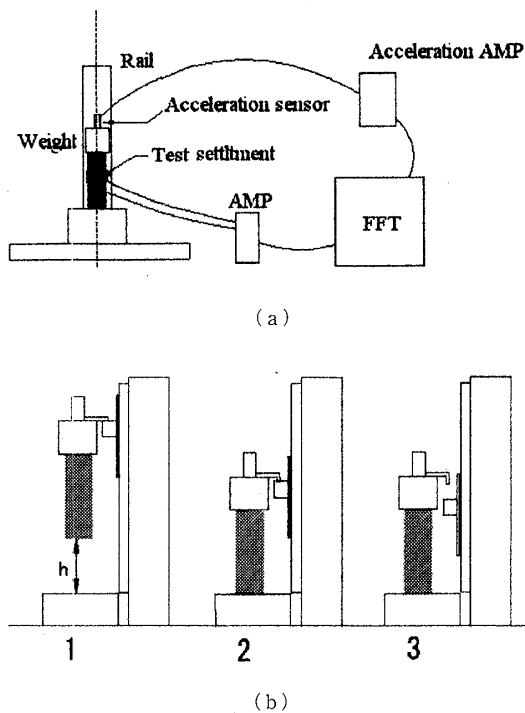


Fig. 3 Test system for shock absorbing characteristic

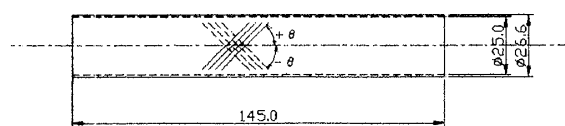
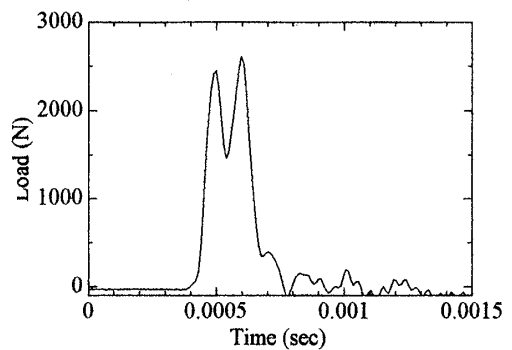
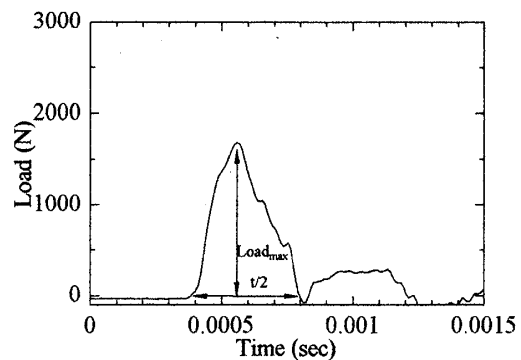


Fig. 4 Diagram of the specimen



(a) The fiber orientation angle is 0°



(b) The fiber orientation angle is 30°

Fig. 5 Relationship between time and $Load_{max}$ at height 100 mm for laminated CFRP cylinder

荷重 $Load_{max}$ を求める。落下高さはそれぞれ 100 mm, 50 mm, 30 mm であり, 100 gf のおもりを採用した。CFRP サンプルの繊維配向角がそれぞれ 0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90° 積層円筒の実験結果を図 6 に示す。縦軸は最大衝撃荷重 $Load_{max}$ で, 横軸は積層円筒の繊維配向角, 黒丸印は測定値である。実験の結果では, 繊維配向角が小さくなると, 最大衝撃荷重は大きくなる。 0° 付近で, 最大衝撃荷重はやや小さくなるのは, 図 5(a) の測定曲線に示したように, 0° 付近の試料の剛性が大きいので, 衝突面の面接触が不完全で, 衝撃荷重曲線の最大値付近で, 大きな凹凸になったからである。

静的な引張実験, ねじり実験などで求めた FRP の力学特性 E_L , E_T , G , ν_{LT} を用いて, 式(6)により, 理論予測をしてみる。その理論予測曲線を図 6 の実線で示した。理論値と実験値について, 両者の誤差は多少あるものの, ほぼ同じ傾向を示していることが確認できる。

図 7 に AFRP サンプルの衝撃緩和性能実験による

Table 1 Details of the specimens

	CFRP	AFRP
Fiber	Carbon fiber (MITSUBISHI RAYON CO., LTD)	VECTIRAN fiber (KURARAY CO., LTD)
Resins	Epoxy resin	
Prepreg	TR350E-100	AFUD-PPHS-100
Fiber orientation angle	$0^\circ, \pm 15^\circ, \pm 30^\circ, \pm 45^\circ, \pm 60^\circ,$ $\pm 75^\circ, 90^\circ$	
Condition of lay-up	Circular cylinder is made from lamina (laminated $(\pm \theta)_n$)	
E_L (GPa)	133.28	45.15
E_T (GPa)	8.35	3.34
ν_{LT}	0.323	0.470
ν_{LT}	0.022	0.011
G_{LT} (MPa)	3.70	1.20

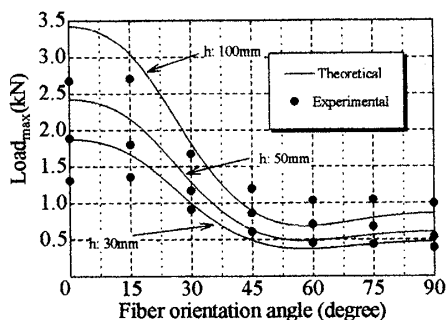


Fig. 6 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load of Laminated CFRP cylinder

計測値と理論計算値との比較を示す。CFRP と同様, 理論値と実験値がほぼ一致している。また, ひずみゲージと加速度センサの測定にはほぼ同じ測定結果が得られた。

これより本研究で提案した理論式の有用性がほぼ確認できた。CFRP の最大衝撃荷重は AFRP の値に比べると大きいことがわかった。

4.2 FRP 材の基礎特性値が緩衝特性に与える影響

FRP 材の基礎力学特性値が積層円筒の衝撃緩和性能に与える影響について, 実験で有効と確認された式(6)により, シミュレートする。計算する際, 使っている FRP の基礎特性値 E_L , E_T , G_{LT} , Ψ_L , Ψ_T , Ψ_{LT} は実験で求めた CFRP 試験片の基礎特性値を基準値としてそれぞれ変化させ, 用いる。

図 8 は CFRP 試験片の基礎特性値を基準値として, E_L を基準値の 2 倍, 4 倍, 8 倍と大きく (破線), または $1/2$ 倍, $1/4$ 倍, $1/8$ 倍と小さく (点線) 変化させ, 他のパラメータを一定として求めた最大衝撃荷重の変化を示す。ここで $\times 1$ は CFRP 材の測定値を表している。縦軸は最大衝撃荷重 $Load_{max}$ で, 横軸は積層円筒の繊維配向角である。落下高さは 100 mm で, 100 gf

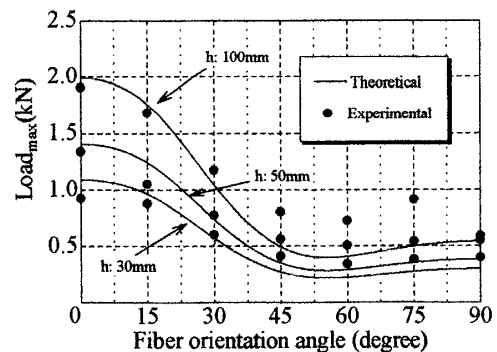


Fig. 7 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load of Laminated AFRP cylinder

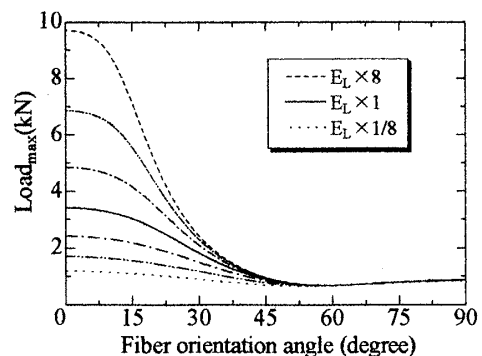


Fig. 8 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load in variation of E_L

のおもりを採用した。

E_L が変化した時の $Load_{max}$ は 90° 付近の値は変化せずそれ以外の部分が変化する。 0° 付近では激しく変化し、 E_L はFRP材の緩衝特性に大きく影響している。 G_{LT} 、 ν_{LT} を図8の E_L と同様の变化をさせた場合のFRP材の緩衝特性への影響を図9と図10に示す。

図9に示したように、 G_{LT} が変化すると 0° と 90° 付近の値は変わらずそれ以外の部分が変化する。 G_{LT} が大きくなると、繊維配向角 45° 付近の最大衝撃荷重は大きくなるのがわかった。

図10では ν_{LT} を変化させた際の最大衝撃荷重の変化を示している。 ν_{LT} が変化しても材料の緩衝特性にあまり影響がないことが確認された。

FRP材の振動減衰性能をおもに表現しているパラメータ Ψ_L 、 Ψ_{LT} について、図8の E_L と同様にそれぞれ変化させ、材料の緩衝特性の影響を調べる。

図11はCFRP試験片の基礎特性値を基準値として、 L 方向の減衰能を基準値の1.5倍と大きく(点線)、または0倍と(破線)変化させ、他のパラメータを一定として求めた最大衝撃荷重の変化を示す。 0° 付近の最大衝撃荷重は L 方向の減衰能が大きくなると、小さくなり、 0° 付近以外の値はあまり変化していな

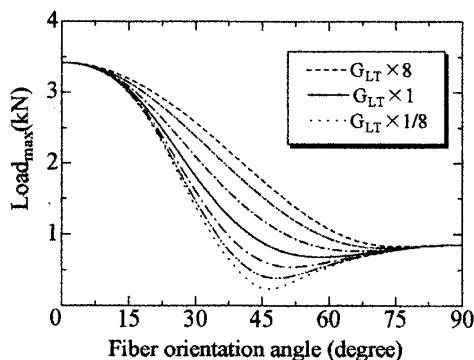


Fig. 9 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load in variation of G_{LT}

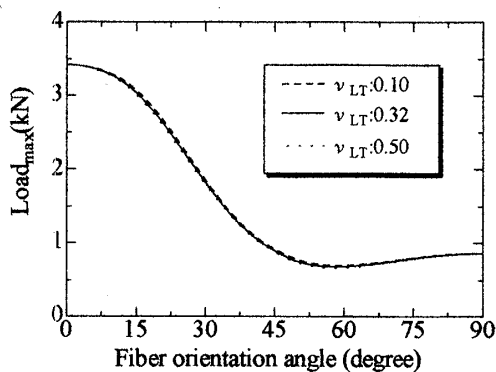


Fig. 10 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load in variation of ν_{LT}

い。その変化程度は E_L と比べると小さく、あまり影響していないことが示されている。これは、本実験の形式ではCFRP材の剛性の大きさに比べて、材料固有の減衰効果による影響が小さいと考えられる。

図12は LT 方向の減衰能だけを変化させた場合、最大衝撃荷重の変化を示している。 LT 方向の減衰能が変化しても材料の緩衝特性にはあまり影響をしていないことがわかる。

5. ま と め

スキーポールをついたときに肩にくる衝撃の影響要素の一つであるFRP積層円筒における緩衝特性に注目し、FRP積層理論を応用したFRPの緩衝計算法を提案した。さらに積層円筒の緩衝特性を測定する装置を製作し、CFRPとAFRPの積層円筒を用いてその最大衝撃荷重を計測した。CFRP、AFRP材について、理論からの予測値は測定値とよく一致し、計算方法の有用性が確認できた。

緩衝計算法を用いて、各材料の基礎特性値(E_L 、 G_{LT} 、 ν_{LT} 、 Ψ_L 、 Ψ_{LT})が最大衝撃荷重に与える影響を

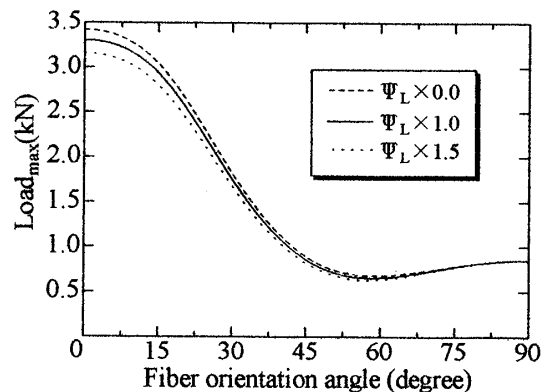


Fig. 11 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load in variation of Ψ_L

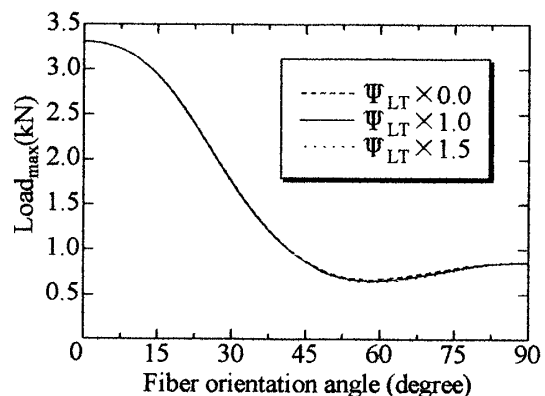


Fig. 12 Relationship between fiber orientation angle and maximum impact load in variation of Ψ_{LT}

シミュレーションにより考察した。基礎特性値のうち、 E_L , G_{LT} がFRP積層円筒の緩衝特性に大きく影響することがわかった。

最後に、測定方法等に関し、有益な助言をいただいた信州大学繊維学部の飯田一助教授と中澤賢教授にお礼を申し上げる。

本研究は文部科学省科学研究費補助金(COE形成基礎研究費; 10 CE 2003)と [(C)(2)11555070-00] の補助を受けて行った。

文 献

(1) Bao, L., Koide, R., Yanagizawa, M., Sakurai, M. and

- Kemmochi, K., *Kansei Eng. Int.*, in press.
- (2) Ni, R. and Adams, R., *J. Compos. Mater.*, **18** (1984), 104-121.
- (3) 藤本醇・田村徹也・金原勲・谷本敏夫, 日本複合材料学会誌, **20** (1994), 145-153.
- (4) 文献(3)の155-161ページ.
- (5) 鮑力民・田村明博・桜井正幸・中沢賢・劔持潔, 日本複合材料学会誌, **28** (2002), 50-55.
- (6) 谷口修, 振動工学ハンドブック, (1976), 872-882, 養賢堂.
- (7) 福田博・邊吾一, 複合材料の力学序説, (1988), 91-110, 古今出版.
- (8) 森口繁一, 初等力学, (1959), 260-264, 培風館.