

CFRP 円筒の衝撃特性の評価とその最適設計

早稲田大学大学院理工学研究科 川田宏之研究室
修士課程 2年 守田知也

1. 緒言

複合材料はその優れた機械的性質から多くの用途に使用されており、スポーツ用品にも多く用いられている。特に、バットや自動車等に Glass Fiber Reinforced Plastic(GFRP),Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP)が積極的に用いられている。特に、人体に直接触れるスポーツ用品などは衝撃をいかに人体に伝えるかの振動特性が重要となるが、最適設計をするためには、構造部材の衝撃応答、動的特性を正確に知る必要がある。だが、複合材料は均質材と異なりマトリクスと繊維での応力波の減衰・層間での応力波の反射など、その衝撃特性をとらえるのは困難である。しかし、過去に使用されてきた衝撃試験機（シャルピー試験機等）ではその衝撃特性を捉えることは、ひずみ速度の測定が難しいことや、試験片形状への依存性が高いことから、衝撃負荷での材料固有の定量的な力学的特性評価は難しいと考えられる。

ここで、上記に記した衝撃試験機に比べて、定量的な評価が行える試験方法として Hopkinson 棒法試験がある。Hopkinson 棒法試験は様々な研究者によって行われており、特に本研究で行う軸方向衝撃試験と類似しているのは、P.Pintado らによる Hopkinson 棒法試験であり、ここでは積層板に対して面外方向から衝撃を与えているもので、衝撃速度の違いによる見かけの剛性の変化を示している。このように、Hopkinson 棒法試験による衝撃試験での高ひずみ速度域における材料の評価は多く行われているが、依然として統計的・体系的な調査は行われておらず、ある特定の条件下での剛性の変化などが示されていることが多い。

これまで、谷口らは動的圧縮荷重下における FRP 円筒の力学的挙動の解明として、Hopkinson 棒法を用いて CFRP 円筒に対して横衝撃を与え、様々なひずみ速度下での荷重 - 変位線図を得、ひずみ速度の増加に伴い、横圧縮剛性、最大横荷重が増大することを確認している。また、円筒材内の応力波伝播について、円筒を切り出したものにひずみゲージを貼り付け、応力波の伝播挙動・分散性を調査し、ウェーブレット変換手法を用いて時間 - 周波数解析をおこなっている。

本研究では、CFRP 円筒の衝撃特性評価を行う。Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB)法を用いて CFRP 円筒の衝撃試験を行い、横方向圧縮下における動力学的特性評価を行った。また、得られた荷重 - 変位線図より剛性および強度のひずみ速度依存性について検討し

た. 加えて, 実構造物設計への基礎研究の一つとして, 円筒内部にフォーム材を充填し, その充填が動力学特性に及ぼす影響についても検討を行った. また, 有限要素法解析ソフト RAIOSS を用いて解析を行い, 実験データとの比較, 検討を行った.

2. SHPB 法試験

2.1 試験片

本試験において, CFRP で作製した円筒型試験片を, SHPB 法試験機を用いて横方向から衝撃を加えて圧縮し, 強度, 剛性のひずみ速度依存性の調査を行う.

試験片は東レ (株) 製のカーボンエポキシプリプレグシートを用い, 内圧成型で作成した試験片を用いる. 繊維含有率 V_f は 60% である. 繊維配向角は $\theta = 90$ [deg] とした. また, 内部に EVA (Ethylene Vinyl Acetate) を充填させたものも用意し, 同様の試験を行う.

試験片緒元を図 1, 表 1 に示す.

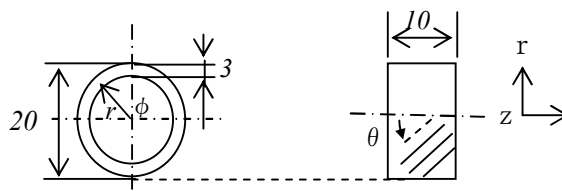


Fig.1 Geometry and dimension of specimen

Table 1 Constitution of CFRP

	Resin	Fiber	Fiber Volume Fraction %
CFRP	bisphenol A	T700	60

2.2 試験機

使用する SHPB 法試験機の概略図を図 2 に示す. 作製した実験装置を Fig. 1 に示す. SHPB 法試験機は, 圧縮空気によって打ち出されたストライカーを入力棒へ衝突させることでひずみ波を励起させ, 入力棒と出力棒の間に挟まれた試験片を通過するひずみ波を, 入力棒と出力棒のひずみを計測することで得る装置である. 本装置のそれぞれの棒のサイズは, 入力棒 ($L_1=4000$ mm, $d_1=16$ mm, steel), 出力棒 ($L_2=1500$ mm, $d_2=16$ mm, steel), ストライカー ($L_3=1500$ mm, $d_3=16$ mm, steel) から構成され, 横方向圧縮のような大きな変位量が予想される試験に対しても適用可能である. ストライカー衝突後の発生した入射波, 反射波, 透過波を貼り付けたひずみゲージ (共和電業 KSP-1-350-E4) によりサンプリング 1.0MHz で測定した.

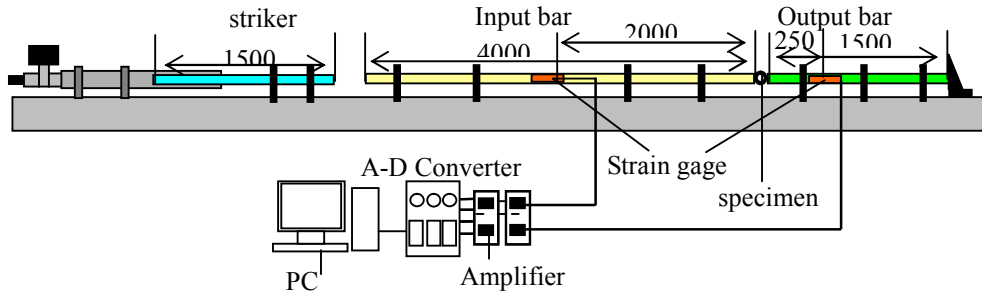


Fig.2 A schematic drawing of Split Hopkinson Pressure Bar method

また、試験片に生じる荷重 P 、変位 u は、計測された入射波 $\varepsilon_i(t)$ 、反射波 $\varepsilon_r(t)$ 、透過波 $\varepsilon_t(t)$ のひずみを一次元波動方程式を用いることにより、以下の式で記述できる。

$$P = AE(\varepsilon_i + \varepsilon_r) = AE\varepsilon_t \quad (1)$$

$$u = c_0 \int_0^t (-\varepsilon_t + \varepsilon_i - \varepsilon_r) d\tau = -2c_0 \int_0^t \varepsilon_r d\tau \quad (2)$$

ここで、 A は試験片断面積、 E は入出力棒弾性率、 c_0 は弾性波速度である。

SHPB 法試験機において、入力棒と出力棒の間に挟み込む試験片の拡大図を図 3 に示す。通常では、SHPB 法試験機を用いると方形型のひずみ波の入力となり、今回のように入力、出力棒との間の設置面積が小さい円筒型試験片に対しては振動が起きてしまうために測定が困難となる。そのため、ストライカーと入力棒の間に鉛の緩衝材を挿入することで励起するひずみ波を立ち上がりのゆるやかなランプ型として振動を抑えることとした。

試験片の評価方法としては、試験片を薄肉円筒と見なし静的圧縮状態時と同様の対称変形が起きると仮定をし、式(1)、(2)より得られた荷重と変位を、以下の式に適用することで試験片最外郭の圧子点直下における曲げ応力と曲げひずみを得た。

$$\sigma = -1.908 \frac{Pr}{Bt^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon = -1.067 \frac{t}{r^2} u \quad (4)$$

3. 試験結果

試験によって得られた曲げ強度、曲げ弾性率のひずみ速度依存性を以下に示す。

図 3 に示したように、ひずみ速度の上昇に伴って強度の上昇が見られる。この範囲では線形的に上昇している。また、図 4 からは、フォーム材の充填によって、CFRP 単体のみでは見られなかった曲げ剛性の上昇が確認された。これについても今回の実験で得た範囲である、ひずみ速度が 100[1/s]までの範囲では線形的に上昇している。

また、高速度カメラでの撮影の様子から、非対称変形として扱わなければならない。しかし、この段階での評価は、前述したように薄肉円筒の対称変形問題として仮定して応力-ひずみの算出を行っているので、今後、評価方法の検討を行う必要があると考えられる。

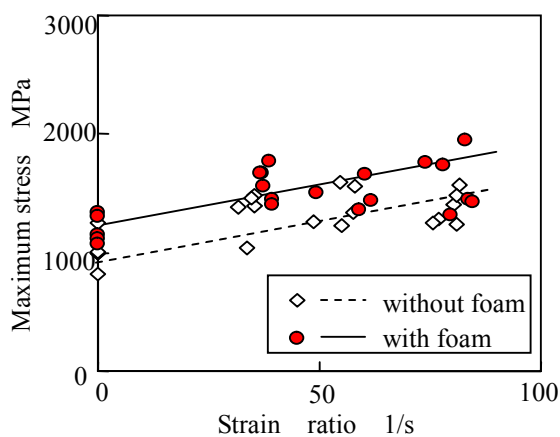


Fig.3 Dependence of strain rate on maximum stress (90deg specimen)

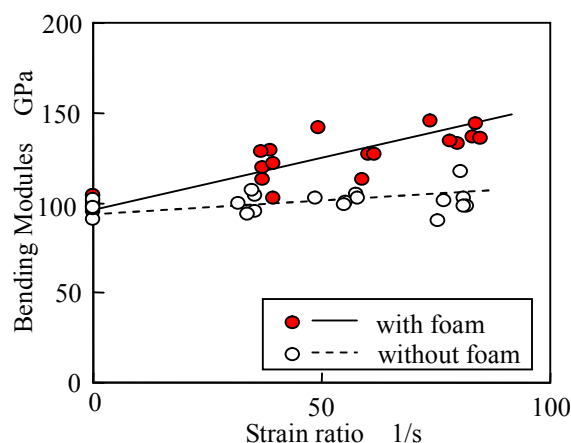


Fig.4 Dependence of strain rate on bending modulus (90deg specimen)

4. 数値解析

試験の再現性や、試験片の衝撃負荷下における挙動予測のために、有限要素法ソフト RADIOSS を用いて数値解析を行う。

試験片のモデルは 4200 要素 5568 接点として単純なモデルとした。今回の解析では、試験片のモデルの一端に瞬間的に初速 20[m/s]を持たせ、剛壁に衝突させた際の荷重点裏の応力線図を得ることとした。Material Property では、デフォルトで組み込まれている Elast-plastic 中の orthotropic を用いた。入力した中の代表的な物性値を表に示す。得られた周方向のひずみ線図を図 6 に示す。

Table.2 Material Property

E_{11} [GPa]	120
E_{22} [GPa]	10.5
E_{33} [GPa]	10.5
G_{12} [GPa]	5.25
G_{23} [GPa]	3.48
G_{13} [GPa]	5.25
n_{12}	0.3
n_{23}	0.51
n_{31}	0.0265

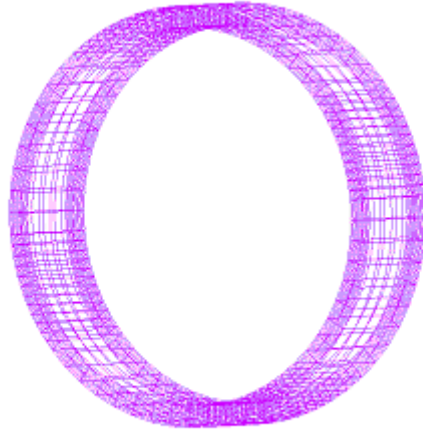


Fig.5 model of specimen

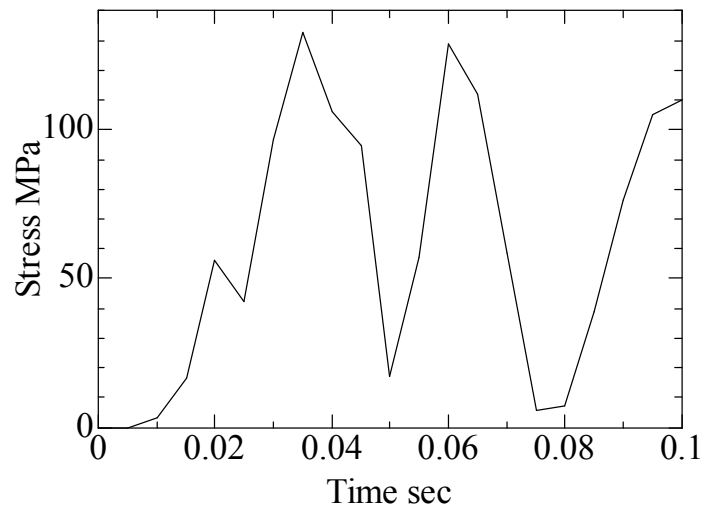


Fig.6 Relation between Stress and Time

ひずみ線図に振動が見てとれる。これは、入力するひずみ波を実験と同様のランプ波にすることで解決されると考えられる。

しかし、今回の解析で入力した物性値、条件等では実験の正確な挙動予測、強度評価が行えないと判断した。今回の解析においては、ひずみ速度依存性を正確に再現できたとはいえ、今後さらに精度を高めていく必要がある。そこで、FORTRAN を用いてユーザーサブルーチンの作成を行う。このサブルーチンにおいて、C.T Sun らが提案した **single-parameter model** を基にしたものを用いる。このサブルーチンを使用することで、今回の実験で測定したひずみ速度 100[1/s]までの範囲はもちろん、それ以上のひずみ速度の範囲においても精度良い予測が得られると考えている。

以上を中間報告とする。

最終報告は、上記したサブルーチンの組み込み、CFRP 円筒試験片、またフォーム材を充填させた SHPB 法試験機も含めた実験の体系的なシミュレーションを行う予定である。

また、CFRP 試験片については、アングルプライ構成の試験片の実験、解析を行い、破壊クライテリオンのひずみ速度依存性の再現をする予定である。

上記の結果と、今後の研究結果については、2006 年 10 月に開催される複合材料学会、もしくは 2007 年 3 月に開催される複合材料シンポジウムにおける発表を考えている。