クラッシング破壊を伴う FRP 材料の衝撃解析用数値モデル†

立石 源 治* 穴 山 明 寛*
横 山 敦 士** 濱 田 泰 以**

A Numerical Model for the Crush-Worthiness Analysis Designed for FRP Materials with Progressive Crushing Behavior

by

Motoharu TATEISHI*, Akihiro ANAYAMA**, Atsushi YOKOYAMA*** and Hiroyuki HAMADA****

Tapered FRP tubes have high energy absorption performance under axial compressive load. FRP will be useful for structural material of a shock absorber in the various industries. And in order to evaluate the behavior of this material, several experimental tests and numerical simulations using FEM are carried out recently. However, it is difficult to simulate properly the behavior of tapered FRP tubes, so called “Progressive Crushing” with FEM, because the fracture mechanism contains various kinds of fractures such as delamination, fiber fracture and so on. In this study, we proposed a special FEM model based on experimental data that is useful for the crush-worthiness analysis of FRP tube.

Key words: FRP tube, Progressive crushing, FEM, Composite materials

1 緒 言

科学技術の進歩に伴い、種々の新しい材料が開発され、構造部材として適用されてきている。そして、自動車産業分野においても省エネルギー化および軽量化を図るため、これまで主に用いられてきた金属に代わる材料として軽量の繊維強化プラスチック (FRP) の使用が注目されている。そこで最近では FRP 円筒の強度および破壊挙動を評価することが重要な課題となっている。

この材料の評価法の1つとして、数多く行った実験結果をデータベース化し、目的とする FRP のエネルギー吸収特性の傾向を把握する試みもなされている。一方、有限要素法によりこの破壊挙動をシミュレートする研究も幾つか報告されている。¹⁾しかしながら、複雑な破壊挙動を伴うこの現象を有限要素法で精度良くシミュレートするには技術的な障壁も多く、また膨大な計算時間が予測される。本研究では、この様な破壊挙動をマクロに表現する数値モデルを開発することにより、実用的な計算時間で FRP 円筒の強度および破壊挙動を評価する試みを行った。また、開発した数値モデルを用いた解析を行い、その有効性の検討を行った。

2 Progressive Crushing と数値モデル

FRP の特徴の1つとして円筒状に加工したものに軸方向圧縮力を加えた場合、Progressive Crushing と呼ばれる破壊挙動を示し、高いエネルギー吸収能力を有することが報告されている。²⁾現在、破壊特性を評価する手段の1つとして有限要素法が多く用いられており、破壊に対するクライテリアも数多く発表されている。^{3)~5)}しかしな

がら Progressive Crushing の様な微視的な破壊挙動を、有限要素法を用いて精度良く解析しようとする場合、幾つかの問題点により適切な解析条件を設定するのが難しい状況にある。

そこでまず、ここではこの破壊挙動の特徴を述べると共に、必要な数値モデルを整理する。Fig. 1 に示すような条件下での破壊実験により FRP 円筒を軸方向に圧縮した際の破壊パターンを Fig. 2 に示す。

材料はガラスクロス/エポキシである。円筒の一端にテーパを設けることにより、端部より破壊が連続的に進展し、材料が円筒の内外に変形する。このときの荷重と変位の関係は、荷重値は破壊後も減少せず、ほぼ一定の値を保ちながら変位が増加する現象を示す。この破壊

Fig. 1. FRP tube crush test condition.

† 原稿受理 平成 13 年 7 月 10 日 Received July 10, 2001

* 日本エムエスシー(株) 〒107-0052 東京都港区赤坂, MSC Software Japan Ltd., Minato-ku, Tokyo, 107-0052

** 正 会 員 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科先端ファイブ科学専攻 〒606-8585 京都府京都市左京区松ヶ崎御所海道町, Graduate School of Advanced Fibro, Sci., Kyoto Inst. of Tech., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8585

挙動のことを Progressive Crushing と呼んでおり、エネルギー吸収効率が高いことから衝撃緩衝部材として有効に用いることができる。Fig. 2, 3 に破壊した円筒の断面写真を示す。層間はく離・繊維破断など様々な破壊挙動が起こっているのがわかる。

このように複雑な現象をシミュレートするには特殊な数値モデルが必要となる。特に、花びら状の破壊パターンの形成メカニズムを表現する数値モデル、破壊パターンが形成された後の破壊進展を表現する数値モデル等が重要であると考えられる。本研究では、破壊パターンが形成された後の破壊進展を表現する数値モデルの提案を行う。

3 破壊進展を表現する概念数値モデル

破壊進展状態を Fig. 4 に示した荷重-変位曲線より観察すると、最大荷重は僅かに振動しながらも、ほぼ一定の値を示しているのがわかる。また、テーパ部分の破壊により形成されたくさび状の部分（以下トリガーと呼ぶ）が、破壊を進展させると想定される。このため、トリガーから十分に離れた部位では、破壊現象は全く発生していない。当然非可逆的な現象であり、破壊発生後の部位は、荷重が除荷されても再び元の状態へと戻ることはない。また、破壊進展中の部位は、強い異方性が発生していることが予想される。そしてこの異方性は、健全な状態での FRP が有する異方性とは異なるものであると想定される。この現象を忠実にシミュレートするには、大規模 3 次元解析を用いた解析となることが想定される。また、必要となる破壊則も複雑なものとなることが予想され、実用上不可能な解析となってしまうであろう。そ

Fig. 2. Crush pattern.

Fig. 3. Cross section.

Fig. 4. Load-Displacement curve of FRP tube crush test.

のため、本研究ではシェル要素を用いた巨視的に破壊現象を表現する数値解法を目指した。そこで、これらの挙動を表現する数値モデルを以下の仮定のもとに開発した。

- 破壊が発生していない部位では一般的に FRP 材料に使用される異方性構成則が適用できる。

- 破壊現象は、トリガーの存在する要素についてのみ発生し、トリガーは要素破壊完了後、隣接要素へと伝ばする。

- 要素破壊は 99% 圧縮ひずみに達したときに完了し、その後要素は剛体となる。

- トリガーの存在する要素は円筒殻軸方向応力を使用し、破壊判定を行う。

- 破壊状態では、弾性状態とは異なる、異方性状態となる。

- 破壊発生後、破壊進行（主軸）方向の剛性は低下する。

- 進展型破壊発生後の円筒軸方向と円周方向のひずみ、応力は連成しており、その連成係数は破壊パターンと円筒の曲率の依存性を強く持つ。

- 円筒軸方向に発生するひずみは、有限メッシュ分割による要素長の依存性を有する。また、要素をまたがって破壊が進展する場合には、複数要素のひずみの累積値を使用することが必要となる。これらの問題点に対処するために、周方向応力算定に際し特殊なひずみの形式を採用する。

- 円周方向のひび割れの進展を支配する剛性を制御する方法として、円周方向応力がひび割れ限界応力に達した時点で応力開放が行われるものと仮定する。

4 破壊進展を表現する数値モデル

4.1 有限要素法解析

本研究では、FRP 円筒の破壊現象をシミュレートするため、シェル要素によりモデル化を行った。尚、有限要素プログラムは MSC.Marc 2000 バージョンを使用した。以下に使用したシェル要素の特徴を述べる。

この要素は、全体座標系での変位と回転角を自由度として有する 4 節点厚肉シェル要素である。座標および変位、回転角には双 1 次の内挿関数が用いられている。また、異方性主軸の向きを任意方向に定義する機能も準備されている。さらには、非線形の構成則をユーザーが開発しこれをプログラムにリンクする機能もあり、本研究では、この機能を用いて独自の構成則を開発した。

4.2 弾性状態

弾性状態においては、一般的に用いられる直交異方性積層材モデルを使用した。式 (1) に各層で用いるひずみ-応力関係式を示す。

ここで、

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1/E_{11} & -\nu_{21}/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_{11} & 1/E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

- ε_{ii} 局所座標系での直ひずみ成分
- γ_{ij} 局所座標系でのせん断ひずみ成分
- σ_{ii} 局所座標系での直応力成分
- τ_{ij} 局所座標系でのせん断応力成分
- E_{11} 異方性主軸方向ヤング率
- E_{22} 異方性第2軸方向ヤング率
- G_{ij} せん断剛性の各成分

尚, このようにして作成された, 局所座標系でのひずみ-応力コンプライアンスマトリックス C_{ij} は, 逆マトリックス形式に変換され, 一般的な応力-ひずみ関係マトリックス D_{ij} となる. その後, D_{ij} は, 材料主軸の全体座標系との関係を考慮して, プログラムにより全体座標系での応力-ひずみ関係式へと変換される. この為以下の説明では, 座標変換は自動的に行われるとし, 全て局所座標系での式を使用する.

4・3 非弾性状態

進展型破壊発生後の増分応力-増分ひずみ関係を式(2)に示す. 式(2)からも自明のように, 連成効果のない異方性材料を仮定している. ここで示す応力-ひずみ関係式は, 剛性マトリックス作成時に使用されるものである.

$$\begin{Bmatrix} \delta \sigma_{11} \\ \delta \sigma_{22} \\ \delta \tau_{12} \\ \delta \tau_{23} \\ \delta \tau_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{11}R_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{22}R_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta \varepsilon_{11} \\ \delta \varepsilon_{22} \\ \delta \gamma_{12} \\ \delta \gamma_{23} \\ \delta \gamma_{31} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここで,

R_{11} 破壊進展発生による主軸方向剛性低下率

R_{22} 破壊進展発生による周方向剛性低下率

$\delta \varepsilon_{ii}$ 局所座標系での増分直ひずみ成分

$\delta \gamma_{ij}$ 局所座標系での増分せん断ひずみ成分

$\delta \sigma_{ii}$ 局所座標系での増分直応力成分

$\delta \tau_{ij}$ 局所座標系での増分せん断応力成分

応力算定時には, 各種降伏応力 (Y_d , Y_s , Y_t , Y_c) を考慮した軸方向降伏応力 σ_{yp} , 周方向降伏応力 σ_{ys} を用いて応力を評価する.

$$\sigma_{yp} = F(Y_d, Y_s, Y_c) \quad (3)$$

$$\sigma_{ys} = F(Y_t) \quad (4)$$

ここで,

Y_d 層間はく離に関連する降伏応力

Y_s せん断破壊に関連する降伏応力

Y_t 引張破壊に関連する降伏応力

Y_c 圧縮破壊に関連する降伏応力

4・4 非線形領域での応力算定と破壊判定

4・4・1 トリガーの設定 進展型破壊を継続的に発生させるには, 特有の破壊パターンが存在する. これは, 破壊開始直後に形成された楔状のクラック先端部 (以降トリガーと呼ぶ) が層間はく離を促し, 引き続きせん断破壊, 圧縮破壊を発生してゆく破壊パターンである. このFRP円筒特有の破壊パターンを円筒断面で模式的に示した図を Fig. 5 に示す. トリガーが存在しない場合には, このような破壊が発生することはない. 従ってこの

Compressive fracturing

Fig. 5. Crushing mechanism in cut section of a cylinder.

トリガーの存在はきわめて重要であり, これを数値解析に導入することが重要となってくる.

本研究では, 進展型破壊が発生している要素には, トリガーが存在していると仮定し, トリガーの存在する要素についてのみ破壊進展判定を行う. またこのトリガーは, 要素の破壊が完了した時点で破壊進展方向の近隣要素に移動する. このトリガーの移動制御は, 有限要素メッシュの定義より決定される要素の繋がり関係を利用する.

4・4・2 主軸方向応力の算定と主軸方向破壊の判定

進展型破壊の発生判定は以下の式を用いて行われる.

$$\sigma_{yp} > \sigma_{11} \quad \text{弾性状態} \quad (5)$$

$$\sigma_{yp} < \sigma_{11} \quad \text{進展型破壊発生} \quad (6)$$

ここで, σ_{yp} は主軸方向破壊応力である.

本研究で提案する破壊モデルでは, 主軸方向は要素座標系第1軸方向を意味し, 円筒殻軸方向と一致する (以下軸方向は, 円筒殻軸方向を意味し, 周方向は円筒殻周方向を意味するものとする). 軸方向ひずみと円周方向ひずみは連成し, その連成係数は進展型破壊のパターンに依存すると仮定している. この仮定の元に, 進展型破壊発生後の主軸方向応力を以下の式で決定されるものとした.

$$\sigma_{11} = \sigma_{yp} + c_2 \sigma_{22} \quad (7)$$

式(7)で使われている c_2 は, 軸方向ひずみと円周方向ひずみの連成係数 c_1 により得られる係数である. また, c_1 はFRP円筒の破壊モード依存型の係数である. 軸方向ひずみと周方向ひずみが連成するならば, 単純化された円筒軸方向ひずみ, 円周方向ひずみと破壊モードの関係は, 模式的に Fig. 6 のように考えることができる.

Fig. 6 では, 円筒破壊中のき裂が一定の角度を保って破壊が発生すると仮定している. 本研究ではこの時の, 円筒軸方向変位と円筒周方向変位の連成の強さを表すパラメータとして θ を導入した. θ をき裂先端の角度と仮定すると連成係数 c_1 は式(8)の関係で示される. 但し, c_1 はポアソン効果を表すパラメータとも仮定している. また式(8)から明らかなように, $c_1 = 0$ のとき, 円筒軸と円周方向のひずみが連成効果を持たない円筒軸方向破壊のみが起り, c_1 の値が大きくなれば強い連成効果を持つようになる.

Fig. 6. Axial -Circumferential Strain relationship during the progressive crushing.

$$c_1 = \frac{dr}{dz} = \sin \theta \quad (8)$$

次に、 c_2 は軸方向応力と円周方向応力の連成係数であり、 c_1 を、平面応力状態での等方性のポアソン比と仮定することにより、次のように決定されると仮定した。

$$c_2 = \frac{c_1}{(1 - c_1^2)} \quad (9)$$

4・4・3 円周方向応力の算定と円周方向破壊の判定
本研究では周方向応力の算定にあたって累積周方向ひずみ ε_{22}^* を導入した。

$$\sigma_{22} = \varepsilon_{22}^* E_{22} R_{22} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{22}^* = \frac{1}{r} c_1 \quad (11)$$

$$1_{new}^* = 1_{old}^* + \delta \varepsilon_{11} 1_{el} \quad (12)$$

ここで、

l_{el} 円筒軸方向要素長

l_{old}^* 増分ステップ開始時の円筒軸方向累積圧縮量

l_{new}^* 増分ステップ終了時の円筒軸方向累積圧縮量

ε_{22}^* 累積周方向ひずみ

c_1 破壊モード依存の連成係数

これは、一般的に用いられるひずみを用いた場合、変形が1つの要素に集中する本解析手法では軸方向に発生するひずみは要素長の依存性を受けてしまうからである。また、要素をまたがって周方向破壊が進展する場合も考慮するために、複数要素のひずみの累積値を導入することも必要であった。

尚、このようにして計算された ε_{22}^* を用いて周方向応力 σ_{22} は計算され、この値が周方向破壊応力（ひび割れ限界応力） σ_{ys} を超えるとき円周方向の破壊が発生し応力開放が行われるものとした。これにより、花弁状の周方向破壊発生現象を考慮した。この様子を模式的に示したものを Fig. 7 に示す。

4・4・4 進展型破壊発生後の剛性低下率 進展型破壊発生後の剛性低下率は、応力-ひずみ関係より以下のように求めるものとした。

$$E_{11} R_{11} \frac{\partial \delta \sigma_{11}}{\partial \delta \varepsilon_{11}} \quad (13)$$

$$\delta \sigma_{11} = c_2 \delta \sigma_{22} = c_2 \delta \varepsilon_{22}^* E_{22} R_{22} \quad (14)$$

Fig. 7. Stress-Strain relationship after crushing (Circumferential direction).

式 (13), (14) より、

$$\delta \varepsilon_{22}^* = \frac{1_{el} c_1 \delta \varepsilon_{11}}{r} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \delta \sigma_{11}}{\partial \delta \varepsilon_{11}} = c_2 \frac{1_{el} c_1}{r} E_{22} R_{22} \quad (16)$$

$$R_{11} = \frac{1_{el}}{r} \frac{E_{22}}{E_{11}} c_1 c_2 R_{22} \quad (17)$$

R_{22} としては、破壊発生後の周方向引張剛性に有効な断面積を考慮し、0.1 を仮定した。

4・5 破壊の終了

要素のひずみが 99% に達すると要素の破壊が終了し、その要素は高い剛性を持つようになる。そして、トリガーも隣接要素へと移動する。これは、破壊が進行して行くときに剛なくさび状のものが形成されることを表現する数値モデルといえるであろう。本研究では暫定的に 99% 圧縮状態を、破壊終了と仮定している。以下に、現在使用している破壊終了後の応力-ひずみ関係を示す。尚、破壊終了後の剛性拡大係数 s_f としては、1000 程度の値を使用するものとした。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{11} s_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

5 本破壊モデルを用いた有限要素解析例

5・1 解析モデル

今回の検討で使用した厚肉シェル要素を用いた有限要素モデルを Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 に示す。

円筒形を構成する厚さ 2.5mm、半径 26.25mm、高さ

Fig. 8. FEM model
(Case1, 3, 4).

Fig. 9. FEM model (Case2).

55mm の圧肉シェルモデルを変形体とし、剛体で圧縮させて Progressive Crushing 現象を発生させることを目的としてモデルを構成した。また、円筒の破壊パターンは $c_1 = 0.174$ ($\theta = 10.0\text{deg.}$) の場合を仮定し、Table I で示す材料定数を使用し、静的微小変形問題として実施した。

今回の検討では、本破壊モデルを適用して破壊発生後の最大荷重の振動現象を再現可能かを確認し、同時にこの破壊モデルの適用にあたって要素分割の依存性がないことを検証した。さらに、円筒の半径が変化したときの影響も確認した。そのために、次に示す5つの解析モデルを使用した。

- Case1 他の Case と比較するための標準 (以下 STD) モデル。軸方向要素長 2.2mm.
- Case2 STD 対比で、軸方向要素長を 2 倍にしたモデル。軸方向要素長は 4.4mm.
- Case3 STD 対比で、周方向破壊応力を考慮しないもの.
- Case4 STD 対比で、周方向破壊応力のクライテリアを変更したもの.
- Case5 STD 対比で、円筒モデルの半径を 0.5 倍の 13.125mm としたもの.

5・2 解析結果

解析の変形図の例を Fig. 11 に、解析から得られた圧縮応力-変位関係を Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 に示す。なお変位は、剛体の円筒軸方向の移動量を示している。

得られた圧縮応力-変位関係より、降伏応力 σ_{yp} に達したときに破壊が発生し、その後応力が周期的に変化しながら変位が進行して行く様子がわかる。なお、周期的に変動する応力-変位関係は円周方向に発生する花卉状

の破壊現象に対応していると考えられる。Fig. 12 では、Case1 と Case2 の破壊後の挙動が一致しており、この破壊モデルが要素分割に依存しないことが確認できる。

また、Fig. 13 より、円周方向の破壊応力 (ひび割れ限界応力) σ_{ys} は破壊発生後の最大荷重の振動現象と密接な関係があり、これを考慮していない Case3 では最大荷重の振動現象は認められないことが観測できる。さらに、Case4 の結果より、円周方向の破壊応力によって最大荷重の振動現象は異なる様相を呈することも確認できる。

Fig. 14 より、Case5 のように円筒半径が変化しても、破壊の発生する降伏応力 σ_{yp} は Case1 に一致し、その後の応力の周期的な変動幅も一致していることが確認できる。一方、円周方向破壊応力の算定は円筒の半径 r にも依存するため、応力-変位関係の変動周期は変化している。

以上より、開発した本数値モデルを用いて、各種パラメータのクラッシング特性への影響が有効にシミュレー

Fig. 10. FEM model (Case5).

Fig. 11. Deformed shape (Case1).

Table I. Material constants.

Unit : MPa

Elastic Constants			
E_{11}	E_{22}	ν_{12}	G_{12}
1.35×10^5	9.62×10^3	0.30	4.50×10^3
Inelastic constants			
	σ_{yp}	σ_{ys}	
Case1(STD), and Case5	-9.7×10	9.7×10	
Case2(Element Length×2)			
Case3		0.0(not included)	
Case4		7.0×10

Fig. 12. Comparison of Stress-Displacement curves with different element length (Case 1 & 2).

Fig. 13. Comparison of Stress-Displacement Curves with different circumferential yield stress (Case 1, 3 & 4).

Fig. 14. Comparison of Stress-Displacement Curves with different radius of FRP cylinders (Case 1 & 5).

トできることが確認された。なお、解析に要した計算時間はペンティアムⅢの CPU を搭載した PC を使用し、約 1800 秒であった。また、増分ステップは 20mm の変形量を計算するために、170 ステップを要した。

6 結 言

FRP 円筒の破壊挙動をシミュレートする数値モデルの提案を行った。また、この数値モデルの有効性を確認するために、静的有限要素解析を行い以下の知見を得た。なお、今後大変形効果、動的効果を導入し本解析手法を拡張する予定である。

○ 従来適切なモデル化が困難であった Progressive Crushing 現象を表現する数値モデルの有効性が明らかになった。

○ このモデルでは円筒の軸方向と円周方向の応力、ひずみの連成効果を、破壊モードと円筒の曲率を考慮した

材料定数によって表現しており、このパラメータの有効性を確認できた。

○ 破壊進展が 1 要素に集中する本解析手法を従来型の有限要素法に適用すると、軸方向に発生するひずみは有限メッシュ分割による要素長の依存性を有する。また、要素をまたがって破壊が進展する場合には、複数要素のひずみの累積値を使用することが必要となる。これらの問題点に対処するため、円周方向応力算定に際して特殊なひずみの形式を採用することにより要素分割に依存しない数値モデルを開発することができた。

○ 本モデルを適用し、FRP 円筒モデルの破壊過程に発生する最大荷重の振動現象を再現できることを確認した。

○ この振動現象は円周方向の花弁状の破壊挙動を定性的に表現しており、円周方向破壊クライテリアであるひび割れ発生応力と密接な関係があることも確認できた。

○ 各種パラメータのクラッシング特性への影響が有効にシミュレートできることが確認された。

参 考 文 献

- 1) E. Haug, O. Fort and A. Tramecon, SAE Technical Paper Series, SAE, 910152, 245 (1991).
- 2) 三石洋之, 後呂 学, 宗村昌幸, 濱田泰以, 自動車技術会春期講演会前刷集, 196 (1996).
- 3) A. G. Mamalis, D. E. Manolacos, G. A. Demosthenous and M. B. Ioannidis, "Crashworthiness of Composite Thin-Walled Structural Components", p.28 (1998) Technomic Publishing Co., Inc..
- 4) D. Hull, Composite Science and Technology 40, 377 (1991).
- 5) E. Haug and A. DeRouvray, Toughness criterion identification for edge notched unidirectional composite laminates, Joint Inst. Adv. Flight Sci. (JIAFS) NASA, Georges Washington University, Arlington, USA, 20 (1984).