FW 円筒の衝撃横圧縮荷重下における破壊挙動に関する研究[†]

平井 恒夫* 横山 敦士**
村田 泰彦*** 武藤 義弘****

Fracture Behavior under Impact Lateral Compression
in Filament-Wound Composites

by

Tsuneo HIRAI*, Atsushi YOKOYAMA**, Yasuhiko MURATA***
and Yoshihiro MUTOH****

When a helical-wound composite cylinder is subjected to lateral compression load, delamination occurs in the interlamina. This delamination causes a remarkable decrease in strength.

In this paper the behavior of macroscopic failure of helical-wound composite cylinder under impact lateral compression load is observed experimentally and the elemental property is made clear. From the numerical analysis, it is made clear that stress wave propagation induces macroscopic fracture.

The following are the main results.

(1) The fracture behavior of helical-wound composite cylinder under impact lateral compression load is affected by the deformation velocity and the winding-angle of filament.

(2) The impact absorbed energy of helical-wound composite cylinder under impact lateral compression load increases with increasing deformation velocity, and this effect becomes remarkable when the winding-angle was large.

(3) The fracture of helical-wound composite cylinder occurs in fiber bundle and interlamina. In particular, interlamina fracture causes a remarkable decrease in strength, because the speed of stress wave propagation is affected by the different mechanical impedance of the fiber bundle-layer and the resin-layer.

キー・ワード：衝撃横圧縮荷重，層間はく離，メカニカルインピーダンス，応力波伝ば

1 緒 言

ヘリカル巻き FW 円筒は，その円筒軸と垂直な方向の負荷（横圧縮負荷）により内部界面において層間はく離を生ずる。この層間はく離は材料の強度低下を招くだけでなく，その機能を損なう大きな原因となる。近年 FW 材が航空機の機体・自動車のプロペラシャフトなど高速度で移動する物体に応用され，適用範囲が広がりつつある。そのため衝撃負荷下での FW 材の破壊挙動を明らかにする必要性が生じてきた。

すでに，著者らは FW 円筒に対して準静的な横圧縮荷重を負荷した場合の微視的および巨視的な破壊挙動を実験により観察し，これらの破壊¹⁾に及ぼす異方性の影響を数値解析により検討してきた。そこで，本報では FW 円筒に対して衝撃横圧縮荷重を負荷した場合の材料内部の破壊挙動を観察し，その基本的特性を

明らかにした。さらに，FW 円筒の破壊発生機構を明確にするために，衝撃初期の応力波伝ば機構を数値解析により求め検討した。

2 供試材料および実験方法

本研究で用いた試料は，ガラス繊維-エポキシ樹脂ヘリカル巻き FW 円筒である。その試料形状を Fig.

Fig. 1. Shape of specimen.

[†] 原稿受理 昭和60年7月15日 Received July 15, 1985

* 正 会 員 同志社大学工学部 京都市上京区烏丸今出川, Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Karasuma-imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

** 正 会 員 大阪府立工業技術研究所 大阪市西区江之島, Osaka Prefectural Industrial Research Institute, Enokojima, Nishi-ku, Osaka

*** 同志社大学大学院 京都市上京区烏丸今出川, Graduate Student, Doshisha University, Karasuma-imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

**** 学生会員 同志社大学大学院 京都市上京区烏丸今出川, Graduate Student, Doshisha University, Karasuma-imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto

Table I. Dimension of specimen.

Specimen	Ply angle θ (deg.)	Outer dia. meter D (mm)	Inner dia. meter D_0 (mm)	Thick- ness t (mm)	Width L (mm)	Ratio of D_0 to D
A	76.0	38.0	30.0	4.0	15.0	0.79
B	47.4	38.0	30.0	4.0	15.0	0.79

1 にその主要寸法を Table I に示す。なお、試料幅と外径内径比は JIS K6911 に準拠したものであり、試料 A と B は巻き角度のみが異なっているものである。

衝撃横圧縮試験に用いた試験機は、二度打ち防止装置が設けられているダイナタップ・ドロップウェイト・インパクトシステム (Model 8000b) であり、本研究の目的に合せて荷重検出部を Fig. 2 に示すように計装化したものである。荷重検出方法は、ガイドポストに沿って落下する重錘側部のフラッグがレーザ光を遮り、フォトトランジスタの電圧変化によりトリガを発生させ、すべての装置の同期を行うものである。衝

Fig. 2. Schematic diagram of load detector.

撃荷重は、打撃側あるいは支持側のロードセルに貼付されたひずみゲージの抵抗変化をブリッジ回路と直流増幅器を通してデジタル・ストレージ・オシロスコープに一たん記憶させ、その後 XY 記録機にその波形を出力させた。なお、ロードセルにおける出力電圧と静的荷重との間には線形な校正関係が得られている。また、衝撃横圧縮下の FW 円筒の破壊状態を知るために、トリガによって同期する遅延装置とストロボ発光装置を用いて試料端面の写真撮影を行った。

実験は衝撃速度を 2.42・3.65・4.26(m/s) の3段階に変化させて行った。

3 実験結果および考察

3・1 衝撃横圧縮を受ける FW 円筒の破壊様相

巻き角度 76.0° の試料 A に対して衝撃速度 2.42(m/s) で衝撃横圧縮負荷を加えた場合の衝撃荷重と試料上部の変位の関係を Fig. 3 に示す。図中において、実線は打撃側ロードセル、破線は支持側ロードセルによって測定されたものである。打撃側の荷重は比較的緩やかに立ち上がり、変位量 1.0(mm) 付近で剛性の低下が見られ、変位量 2.3(mm) 付近で衝撃荷重の急激な低下現象が起る。その後、衝撃荷重は振幅の大きい

Fig. 3. Relation between impact load and displacement of specimen A ($V=2.42$ m/sec.).

規則的な振動を繰り返しながら減少し最終破壊に至る。支持側は打撃側に対して約 65(μ s) の遅れが見られ、打撃側より急激な立ち上りを示すがほぼ打撃側の衝撃荷重-変位曲線と同様の傾向を示す。

巻き角度 47.4° の試料 B に対して衝撃速度 2.42 (m/s) で衝撃横圧縮負荷を加えた場合の衝撃荷重と変位の関係を Fig. 4 に示す。打撃側・支持側とも試料 A とほぼ同様の変位量において剛性低下と荷重の急激な低下が見られるが、試料 B における衝撃荷重-変位曲線は試料 A で見られたような急激な変化はなく、比較的緩やかな増減を示す。また、支持側の打撃側に対する立ち上りの遅れは約 90(μ s) である。

Fig. 4. Relation between impact load and displacement of specimen B ($V=2.42$ m/sec.).

ここで FW 円筒の破壊の様相を調べるために、衝撃荷重-変位曲線における剛性の低下する点 (step 1) と一回目の急激な荷重の低下を示す点 (step 2) において試料端面の写真撮影を行った。

Fig. 5 に衝撃速度 2.42(m/s) に対する試料 A の写真とスケッチ図を示す。step 1 では試料下部が扁平しているが、この図からは試料内部の破壊状況を明確に観察することはできない。step 2 では試料斜め上部と下部の内側から約 3 分の 1 の位置に内部界面方向に沿って層間はく離が生じているのが確認できる。Fig. 6 における試料端面の写真とスケッチ図は試料 B の衝撃速度 2.42(m/s) の場合である。step 1 では試

Fig. 5. Aspect of delamination growth on specimen A ($V=2.42$ m/sec.).

Fig. 6. Aspect of delamination growth on specimen B ($V=2.42$ m/sec.).

料Aと同様に試料下部が扁平しているのみである。しかし、step 2 では試料下部内側から約3分の1の位置の内部界面方向における層間はく離に加えて、試料Aとは異なった繊維束の破壊が見られる。

3・2 破壊様相に及ぼす変形速度の影響

衝撃速度を $2.42 \cdot 3.65 \cdot 4.26$ (m/s) の3段階に変化させて試料Aと試料Bに衝撃横圧縮荷重を加えた。

Fig. 7 に層間はく離による衝撃荷重の急激な低下現象が起るまでの試料Aの衝撃荷重と変位の関係を各衝撃速度について示す。衝撃速度 $3.65 \cdot 4.26$ (m/s) の衝撃荷重-変位曲線は、衝撃速度 2.42 (m/s) のものと同様の傾向を示し、荷重の急激な低下現象が起る変位量において衝撃速度の違いによる変化は見られない。しかし、衝撃速度の増加に伴い最大荷重も増加する傾向にある。Fig. 8 に試料Bの衝撃荷重と変位の関係を示す。試料Bにおいても試料Aと同様に衝撃速度の増加に伴って最大荷重が増加する。しかし、衝撃荷重-変位曲線は試料Aとは異なり、衝撃速度によって最大

Fig. 7. Relation between impact load and displacement of specimen A.

Fig. 8. Relation between impact load and displacement of specimen B.

荷重の発生する変位量に差が見られる。また、その曲線においては試料Aのような急激な変化はなく、比較的緩やかな曲線の変化を示す。

つぎに、衝撃速度 $2.42 \cdot 3.65$ (m/s) について破壊の様相が顕著に見られる step 2 の試料端面の写真に

Fig. 9. State of delamination in Step 2 (specimen A).

Fig. 10. State of delamination in Step 2 (specimen B).

について検討する。

Fig. 9 に試料Aの試料端面の写真とスケッチ図を示す。試料Aでは、衝撃速度の増加に伴い内部界面に沿って層間はく離が拡大する。Fig. 10 に試料Bの場合を示す。試料Bでは内部界面において層間はく離が生じるが、衝撃速度の増加による変化はほとんど見られず繊維束内に発生する破壊が増大する傾向にある。

このように、試料Aが層間はく離による樹脂層のみの破壊で荷重低下が発生するのに対し、試料Bでは層間はく離に加え繊維束内の破壊が発生し2種類の破壊が組み合わさった複雑な破壊様相を示す。この複雑な破壊が発生するために、試料Bでは最大荷重を示す変位量が異なり衝撃荷重-変位曲線は比較的緩やかな曲線の変化を示す。

3・3 吸収エネルギーに及ぼす速度の影響

衝撃荷重-変位曲線における急激な荷重の低下現象が見られるのは層間はく離により試料内部に蓄積されたエネルギーが内部界面で開口エネルギーとして費やされるためと予測される。そこで、衝撃荷重が急激に低下するまでの吸収エネルギーについて検討した。吸収エネルギーは次式により算出した。

$$E_a = \int_0^T v_u p_u dt - \int_0^T v_l p_l dt$$

ここで、 E_a は吸収エネルギー (N・m)、 v はロードセルの変形速度 (m/s)、 p は検出された荷重 (N)、添え字 $u \cdot l$ はそれぞれ打撃側・支持側を示し、時刻 T はひずみ量 0.4・0.6・0.8(%) および破壊 (step 2) に相当する時間とした。なお、吸収エネルギーを算出する際、層間はく離の発生する step 2 までの初期を検討したため、変形速度 v は一定とみなした。Fig. 11 に試料Aの吸収エネルギーと変形速度の関係を示す。吸収エネルギーはひずみ量および変形速度の増加に伴い増加する。とくに衝撃的な負荷を受ける範囲内では、吸収

Fig. 11. Relation between absorbed energy and deformation velocity on specimen A.

Fig. 12. Relation between absorbed energy and deformation velocity on specimen B.

エネルギーの増加の割合が非常に大きくなる。Fig. 12 に試料Bの吸収エネルギーと変形速度の関係を示す。試料Bでは試料Aと同じ傾向を示すが、吸収エネルギーが小さいことがわかる。

以上の実験結果より、衝撃横圧縮負荷を受けるFW円筒においては巻き角度および衝撃速度が大きくなるほど、最大荷重および吸収エネルギーに対して大きな影響を及ぼす。また、FW円筒の衝撃横圧縮負荷下の剛性低下の原因は実験では明確にすることができなかった。しかし、その後層間はく離が試料下部内側から約3分の1の位置で発生し内部界面方向に沿って拡大するため、荷重の急激な低下が起ることが確認できた。

4 数値解析による応力波伝ば機構の解明

実験において層間と繊維束の2種類の破壊を確認することができ、とくにFW円筒の強度に影響を及ぼす原因は層間はく離であることが認められた。本章では、FW円筒の巨視的な破壊発生機構をよりよく明らかにするために衝撃初期の応力波の伝ば状況を数値解

析により求め、応力波の伝ばが巨視破壊の発生に与える影響について検討した。

4・1 解析モデル

すでに著者らは静的横圧縮荷重を受ける FW 円筒には巻き角度の相違による異方性および繊維束と樹脂との界面での変位の不連続性を考慮したモデルを提案し、その有効性を認めてきた¹⁾。しかし、衝撃荷重を受ける場合、繊維束層と樹脂層のメカニカルインピーダンスの相違が衝撃荷重初期の応力波伝ばに大きな影響を与えると考えられ、巨視的な観点からの繊維束層の存在を明確に考慮したモデルを用いた。そこで、材料定数の異なるプライグループを同心円上に重ねた。これにより FW 円筒において繊維束層と樹脂層が交互に積層されているものとし、極座標系つまり半径方向に対して異方性の効果が与えられたことになり、これを混合モデルとした。

用いた要素は六面体八節点要素であり、ここでは Z 方向の変位をすべて拘束し二次元化を行った。Fig. 13 に要素分割図を示す。境界条件は A～B・C～D の X 方向変位および D の Y 方向変位を拘束し、円筒と重錘および円筒と固定面との間の接触を考慮した。要素分割は半径方向について 12 のプライグループに分割し、図中黒塗りのプライグループは樹脂層を、他のプライ

Fig. 13. Model used in impact analysis.

グループは繊維束層とした。なお、解析モデルの構成関係は繊維束層、樹脂層とも等方性弾塑性体を用いた。これらの材料定数を Table II に示す。また静的な負荷を受ける FW 円筒の数値解析結果によると繊維束層と樹脂層との界面に働くせん断応力が破壊発生に対して大きな影響を及ぼすことが明らかとなっているため、ここでは最大せん断応力を用いて破壊発生について検討した。

4・2 数値解析結果と考察

混合モデルに対する衝撃荷重負荷後 20(μ s) の最大せん断応力分布を Fig. 14 に示す。混合モデルでは、衝撃荷重を負荷した点の繊維束層で高い応力値を示し、応力波は試料内側・外側とも繊維束層で速く進行し試料斜め下部まで達している。しかし樹脂層では試料斜め上部にとどまり繊維束層に対して遅れを生じている。また、繊維束層と樹脂層の応力波はそれぞれ 20(μ s)・30(μ s) で試料下部に達していた。

Fig. 14. Diagram of maximum shearing stress distribution (Time=20 μ s: Mixed model).

混合モデルに対する衝撃荷重負荷後 100(μ s) の最大せん断応力分布を Fig. 15 に示す。負荷後 100(μ s) では、さらに応力波は円周方向に進み試料下部で応力波の反射が見られる。また、円周方向すべての領域で高い応力値を示しとくに試料側部と下部の内側繊維束層で高い値を示しており、繊維束層と樹脂層との間に応力値の差が生じている。

一方、等方性モデルに対する衝撃荷重負荷後 50(μ s) の最大せん断応力分布を Fig. 16 に示す。等方性モデルでは、混合モデルと同様に衝撃点直下で高い応力値

Table II. Material constants.

		Young's modulus E_x (GPa)	Young's modulus E_y (GPa)	Shearing modulus G_{xy} (GPa)	Poisson's ratio ν_x	Yielding stress σ_y (MPa)	Hardening ratio H (GPa)
Mixed model	Reinforced layer	33.0	33.0	13.2	0.25	24.5	26.5
	Resin	2.94	2.94	1.08	0.36	9.80	0.59
Homogeneous isotropic model		13.9	13.9	6.01	0.16	10.8	5.45

Fig. 15. Diagram of maximum shearing stress distribution (Time=100 μ s: Mixed model).

Fig. 16. Diagram of maximum shearing stress distribution (Isotropic model).

をとるが、応力波は試料内側・外側とも同じような進展を示す。また、応力波は試料下部に達しており、混合モデルで見られたような試料内側と外側との応力値の差は見られなかった。さらに試料下部対称面付近において応力波の反射が起っているのが確認できる。

つぎに、混合モデルと等方性モデルの塑性ひずみが生じた領域より破壊発生位置を検討する。

最大せん断応力分布図より応力波の反射が見られ、樹脂層と繊維束層との応力値の差が大きくなる負荷後100(μ s)の混合モデルと等方性モデルの試料内に発生する塑性域の分布を Fig. 17 に示す。混合モデル、等方性モデルとも衝撃点直下で塑性域が多く発生している。また、試料内側表層は全域が塑性域となっている。等方性モデルでは、試料側部表層に多くの塑性域が生じているのに対して、混合モデルでは試料内側の繊維束層と樹脂層に塑性域が生じている。

以上の結果より、混合モデルにおいては、試料下部内側から3分の1の位置で応力値が高くなり塑性域が生じる。これは実験で見られた層間く離発生位置と良い一致を示している。このことからFW 円筒に衝

Fig. 17. State of plastic strain (Time=100 μ s).

撃横圧縮荷重が負荷されると試料下部内側から約3分の1の位置で剛性低下の原因となる微視破壊が発生し、その後応力波の反射の繰返しによりその位置での応力値が高まり巨視破壊に至ると推測される。

5 結 言

巻き角度の異なる2種類のヘリカル巻きFW 円筒に対して衝撃横圧縮荷重を加え、その結果を検討しFW 円筒の破壊挙動を明らかにした。さらに、実験において解明することが困難な衝撃初期の応力波伝ば機構を明らかにした。その結果を次に示す。

(1) 衝撃横圧縮荷重を受けるFW 円筒の破壊挙動は試料の巻き角度と変形速度の影響を受ける。巻き角度の大きいFW 円筒では変形速度の増加に伴い層間く離が内部界面方向に拡大する。それに対し巻き角度の小さいFW 円筒では層間く離と繊維束内の破壊が起りその破壊様相は変形速度に影響される。

(2) 衝撃横圧縮荷重を受けるFW 円筒の吸収エネルギーは変形速度の増加に従って大きくなり、その影響は巻き角度が大きい場合ほど顕著である。

(3) FW 円筒には繊維束と層間の破壊が考えられ、とくにFW 円筒の強度低下を招く破壊は層間く離であり、数値解析より得られたく離発生位置と一致した。この層間の破壊は繊維束層と樹脂層のメカニカルインピーダンスの相違が応力波伝ば速度に影響を与え、層間でのせん断応力値の差を招くことにより発生することが明らかとなった。

(昭和60年3月20日 第14回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 平井恒夫, 片山伝生, 濱田泰以, 村田泰彦, 材料, **34**, 377 (1985).
- 2) JIS K6911.
- 3) F.A. Myers, 37th Annual Conference, Reinforced Plastic/Composites Institute, 1-C, 1 (1982).