

軟質心材を用いた CFRP サンドイッチ材の衝撃曲げ特性

日大生産工 (院) ○浅井岳仁

日大生産工 邊吾一

1. 緒言

サンドイッチ構造とは、軽量かつ、せん断剛性の高い心材(コア)の上下に耐荷能力のある表板を結合し、軽量化を実現させながら大きな曲げ剛性を得るように構造効率を高めた構造であり、軽量化が強く要求されている航空機などの飛翔体構造に広く用いられている。また、比強度、比剛性に優れる炭素繊維強化プラスチック(以下 CFRP)は航空機から、スポーツ分野まで広く利用され、サンドイッチ構造の分野においても必要不可欠なものとなっている。サンドイッチ構造は、その構造上、せん断剛性の高い心材が要求されるため、アルミ等のハニカム材を用いるのが一般的であるが、本研究では、フォーム材が持つ断熱性や遮音性、衝撃吸収性などの特徴のうち衝撃吸収性に着目し、ロハセルとウレタンフォームという 2 種類のフォーム材を用いて、衝撃試験を行った。また、静的曲げ試験も行い、得られたデータを元に衝撃荷重を受けた軟質心材を有するサンドイッチ材の変形及びエネルギー吸収率を調べると共に、破壊様相についても観察した。

2. 試験

2. 1 試験片 サンドイッチの表材は炭素繊維(三菱レイヨン TR330-150S)のプリプレグを(0° /90° /90° /0°)のクロスプライ積層し、ホットプレスで加熱加圧成形した。心材にはサンドイッチ構造によく用いられるフォーム材(ローム社製 ロハセル 51IG)と一般的なウレ

タンフォームを用いた。ウレタンフォームの発泡倍率は 20 倍である。

表材と心材はエポキシ接着剤(セメダイン EP-008)で接着し加熱成形した後、精密切断機で所定の大きさに加工した。試験片の寸法を Table1 にサンドイッチ構成材料の物性値を Table2 に示す。また、破壊部の観察を行うために、心材にロハセルを用いて、表材に炭素繊維の織物をビニルエステル樹脂で一体成型し、試験片を製作した。試験片の寸法は Table1 に準ずるが、材料物性値については紙面の都合上割愛する。

Table1 Dimensions of Sandwich Beam

Core	Rohacell	Polyurethane
Width mm	25.4	25.4
Length mm	300	300
Face Thickness mm	0.56	0.56
Core Thickness mm	9.88	9.88
Mass g	19	18

Table2 Material Constants

	CFRP	Rohacell	Polyurethane
E_T MPa	142×10^3	70	15
E_L MPa	8.8×10^3	-	-
G MPa	4.2×10^3	19	3.9
ρ kg/m ³	1.64×10^3	52	50

2. 2 静的曲げ試験 衝撃試験を行う前に、サンドイッチ材の静的 3 点曲げと 4 点曲げ試験を行った。試験機はオートグラフを用い、試験条件は圧子の送り速度 1mm/min, 支点間距離は 3 点曲げが 270mm, 4 点曲げの負荷圧子間が 90mm, 支点間が 270mm で行い、荷重、変位、ひずみを計測した。

Impact bending Properties of CFRP Sandwich Beam which used Flexible Foam as Core

Takehito Asai, Goichi Ben

1に示す. 試験機は落錘式衝撃試験機を用いた. 落錘体の写真を Fig. 2 に寸法を Table3 に示す. 試験片は静的試験と同様の物を用いた. 試験片の両端を完全固定し, 試験片の中央部上面に 500mm の高さから加速度計をつけた落錘体を落下させ加速度を測定し, 光学式非接触変位計で落錘体変位を計測した. また, 試験片の引張り側表面の中央部と端部, さらに圧縮側の端部にひずみゲージを貼り付け, ひずみも計測した(Fig. 8)

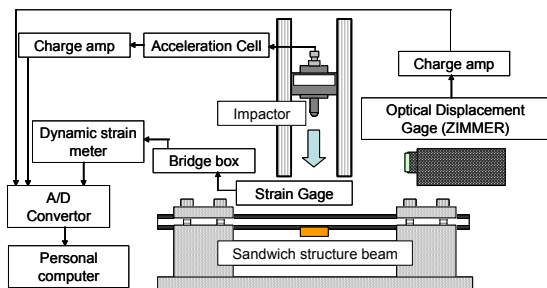


Fig. 1 Experimental Apparatuses

Table3 Dimensions of Impactor

Impactor	Small	Large
Tip Radius mm	5	12.5
Mass g	880	6500
Speed m/s	3.13	3.13
Drop Height mm	500	500



Fig. 2 Impactor

3 実験結果と考察

3. 1 破壊様相 静的曲げ試験の場合, 心材にウレタンフォームを用いた試験片は荷重負荷点の心材がせん断破壊し, 試験片端部においては表材と心材の接着層で剥離が起きている(Fig. 3a). 表材には損傷は見られなかった. 次に, 心材にロハセルを用いた試験片は上部表材の荷重負荷点で破壊が起こり, 表材である CFRP の破断と心材のせん断破壊により起こ

っている(Fig. 3b). また, 表材を一体成型した試験片については, ロハセルを用いた試験片と同様の破壊様相であった.

せん断剛性の低いウレタンフォームの試験片はサンドイッチ効果が得られず, 二枚梁のようになり接着層で剥離し, ウレタンフォームが破

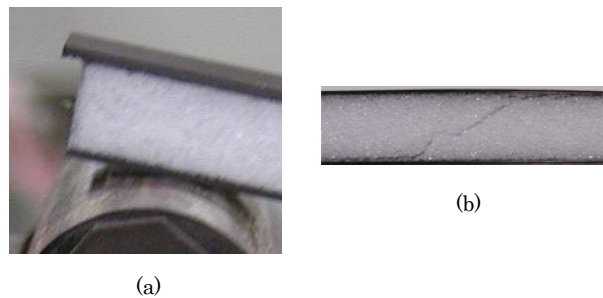


Fig. 3 Failure Modes after bending test

断したと考えられる. また, 心材にロハセルを用いた試験片は, せん断剛性が高く, サンドイッチ効果を発揮し, 表材の破断と同時に試験片自体の破壊に至ったと考えられる.

衝撃試験の場合の破壊は, 表材が一体成形した織物材と積層材の試験片で異なり, 前者は試験片上部の衝撃点で表材の破断により起きている(Fig. 4b, c). 後者の場合は心材の種類を問わず, 心材と表材の層間の剥離(Fig. 4a)で起きている. さらに心材にもき裂が生じている. また, 全ての場合において, 試験片の下部の引張り側では3点曲げ, 4点曲げ, 衝撃試験共に破壊は見られなかった.

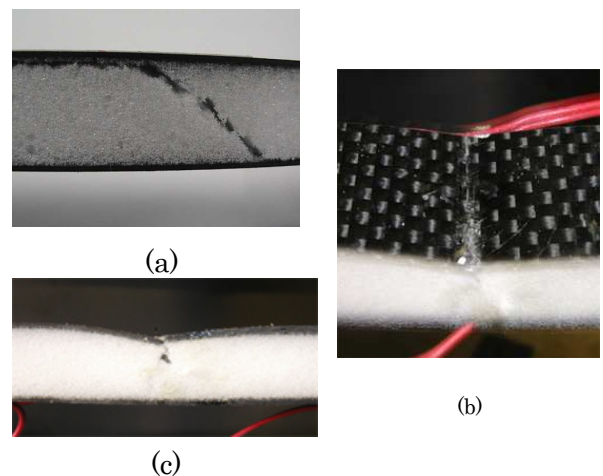


Fig. 4 Failure Modes after impact test

3. 2 試験片の挙動 Fig. 5はウレタンフォームとロハセルの静的3点曲げ試験の荷重-変位線図である。どちらの場合も荷重と変位の関係が線形の領域をすぎると試験片に試験機の圧子がめり込み、荷重負荷点が局所的に変形する。その後、心材にウレタンフォームを用いた試験片は、表材と心材の接着層が剥離し心材が破断する。心材にロハセルを用いた方は、圧子が表材にめり込み、局所的に大きな変形を起こして表材と心材が同時に破壊に至る。ウレタンフォームとロハセルの試験結果を比較すると、心材の剛性が高くよりサンドイッチ効果が大きいロハセルを用いた試験片の方が高い曲げ強度を得られた。

衝撃試験の試験片の挙動については、心材による影響は少なく、静的試験同様、心材がロハセルの試験片の方の破壊強度が高いが、データの形はほぼ同じものである。落錘体の変位を Fig. 6に示す。時刻は落錘体が試験片に接触した時刻を原点としている。変位は原点の条件より負の値を取るため、反転している。落錘体は、試験片に接触した後、試験片を破壊するが、完全破壊には至らないため、6.5msec付近でリバウンドする。Fig. 7にひずみ-時刻線図、Fig. 8にひずみの位置を示す。ひずみは試験片の荷重負荷点の下部と荷重負荷点から50mmの距離にサンドイッチの上下に貼り付けたひずみゲージから計測した。"1"と"2"の位置において、ひずみが最大になった後に上下のひずみに差が生じているのは、試験片上部の表材が衝撃荷重により破断し、表材の応力が瞬時に除荷されたためである。また、"2"と"3"の位置においては、ひずみの応答、大きさに差がある、これは、サンドイッチ試験片が荷重負荷点で局所的に衝撃を吸収していると考えられる。試験片の表板だけを同様に試験するとひずみの時間的応答はほぼ同時に変化するために、この結果はサンドイッチ構造の特徴的な挙動と考えられる。

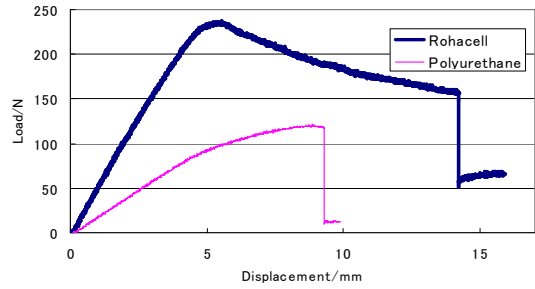


Fig. 5 The comparison of the bending test.

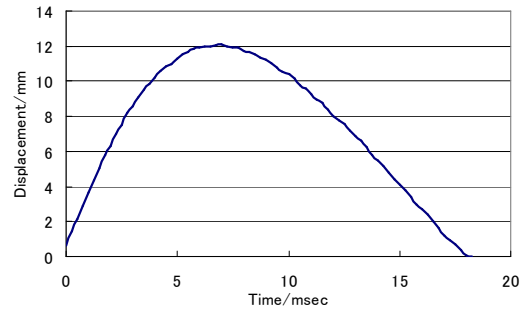


Fig. 6 Impact Displacement vs. Time

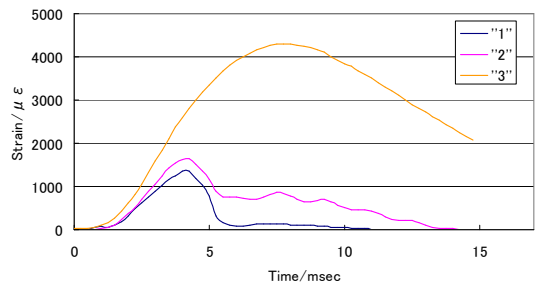


Fig. 7 Strain vs. Time

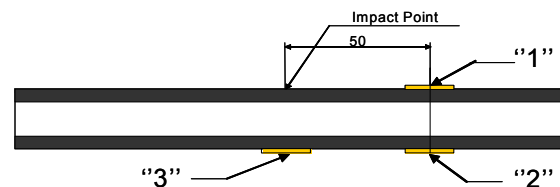


Fig. 8 Measuring Points of Strain gages

3. 3 エネルギーの授受 Fig. 9の荷重-変位曲線の面積が衝撃エネルギーになる、この面積を積分により求める。次に、落下前とリバウンド後の落錘体のポテンシャルエネルギーを求める。これらの値を Table4 に示す。心材の種類による変化はあまり見られなかった。サンドイッチ試験片は、落錘体のポテンシャルエネルギーの 95.5%を吸収している。サンドイッチ試験片の表材だけを同様に試験したところ、吸収したポテンシャルエネルギーは 63.1%であった。サンドイッチ材と表材のみの場合を比較すると、サン

ドイッチ材の方がより多くのエネルギーを少ない変位で吸収していることがわかり、サンドイッチ試験片の方が効率的にエネルギーを吸収していると考えられる。また、リバウンドしたことにより吸収しきれなかったエネルギーは衝撃の瞬間に起きた音、試験片の振動、あるいは試験片の拘束部の摩擦による損失や熱などが考えられる。今回の試験では試験片が最終破壊に至っていないため、試験片の最大吸収エネルギーは計測できないが、表材の CFRP の破断強度から考えるとより多くのエネルギーを吸収できると予測できる。

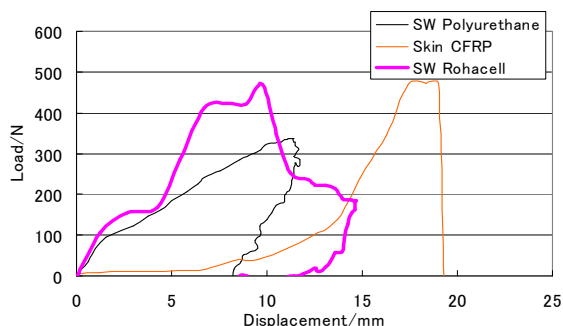


Fig. 9 Impact Load vs. Displacement

Table4 Comparisons of Impact Energy

Specimen	SW Rohacell	Skin CFRP
Drop Height mm	500	500
Potential Energy J	3.74	3.74
Impact Energy J	3.57	2.36

4 解析

汎用有限要素プログラム ANSYS ver7. 1 を用いて、静的 3 点曲げ試験を数値解析し、実際の結果と比較した。解析モデルは、非線形積層シェル要素 SHELL91 を使い、サンドイッチオプションを適用した。材料定数と幾何学的形状寸法は Table1 と 2 の値を用いて試験の線形区間を解析した。解析のモデルを Fig. 10 に示す。(b)は解析モデルの拡大図である。メッシュ分割は、幅方向が 10 分割、長手方向が 20 分割である。現段階では、線形区間の解析のため、試験片の表材と心材の層間での剥離やずれは無視し、解析モデルも表材と心材の接点を共有したモデルを構築した。静的 3 点曲げ試験の

荷重-変位線図を Fig. 11 に示す。FEM で解析した結果と試験結果と比較すると、両者はよく一致している。

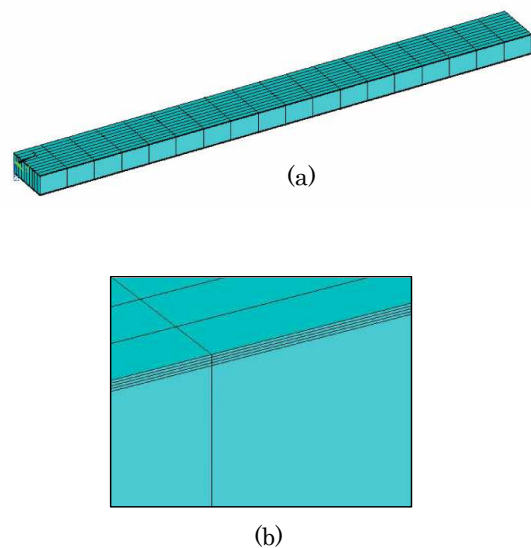


Fig. 10 FEM Model

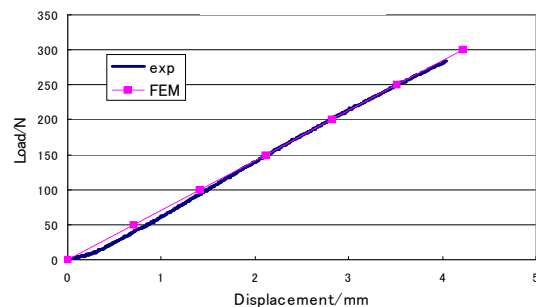


Fig. 11 Comparison of FEM and test.

5 結言

サンドイッチ材の静的及び動的な試験を行い、試験片の静的挙動と動的挙動について調査した。前者については数値解析を行い、両者の一致を示した。後者は、破壊の様子を観察し、衝撃のエネルギー関係を明らかにした。今後は、動的試験で試験片を完全破壊し、試験片の最終強度を求める。また、有限要素を用いて、動的な衝撃解析も行う。また、サンドイッチ材の積層構成と強度、吸収エネルギーの関係も明らかにする。

6 参考文献 省略