炭素繊維強化樹脂/アラミドハニカム心材サンドイッチはりの 機械的特性と破壊機構に及ぼす水環境の影響†

駒井 謙治郎* 城下 莊平* Gilles Kilidjian**

Influence of Water on Mechanical Properties and Fracture Mechanism of FRP/Aramid Honeycomb Core Sandwich Material

by

Kenjiro KOMAI*, Sohei SHIROSHITA* and Gilles KILIDJIAN**

Carbon fiber reinforced facing/aramid honeycomb core sandwich composite materials were studied through three point bending test. In order to clarify the influences of water on the stiffness and strength, the dry and wet specimens were used. At the same time, the fractured specimens were inspected by a scanning electron microscope (SEM) and a scanning acoustic microscope (SAM) to observe the superficial and interior fractures of the specimens, respectively, and the fracture mechanism was analyzed. The experimental results showed the following.

- (1) Sandwich material increased the bending stiffness a little after its absorption of 6 wt.% water, but decreased the shearing stiffness by about 10%.
- (2) Water absorption affected the core shearing strength more than the facing strength.
- (3) The strength of interface between the facing layer and core of sandwich materials was larger than that of the matrix resin.
- (4) The buckling axis was observed on the compressive fracture surface of the wet specimens more than that of the dry specimens, which shows that most fibers in the wet specimens are fractured by compressive stress.
- (5) In case of short span beams whose length was shorter than 200 mm, the wet specimens flexed more than the dry specimens. It is thought to be caused by the degradation of cell wall of the core.

Key words: Sandwich material, CFRP, Aramid honeycomb, Three point bending test, Bonding, Delamination, Strength, Stiffness, Water absorption, SEM, SAM

1 緒 言

サンドイッチ複合材料は航空機産業において、現在では標準的な材料になっており、機械的特性等についての研究もかなり行われている。¹⁾⁻⁴⁾ しかしながら水環境における強度特性をフラクトグラフィ的側面から研究したものはほとんどなく、破壊のメカニズムを知る上で十分とは言えない。

筆者等のグループでは、先進繊維強化複合材料を種々の環境中で実験し、機械的強度を求めるとともに、主にSEM(走査型電子顕微鏡)によって破面を観察し破壊機構を解明してきた。⁵⁾⁻⁹⁾ また、SAM(走査型超音波顕微鏡)を用いて材料内部の損傷状況についても明らかにし、SAMを複合材料の破壊機構の解明に適用することの有用性を示した。¹⁰⁾⁻¹³⁾ 本研究ではそのようなフラクトグラフィ的解析方法を炭素繊維強化樹脂/アラミドハニカム心材のサンドイッチ複合材に適用して、空中保存材と水中浸漬材について曲げ強度を調べるとともに、表面および内部の損傷をSEMおよびSAMによって観察し、破壊に及ぼす水環境の影響を調べた。

吸水による曲げ剛性、せん断剛性、表面強度、心材せ

ん断強度の変化、表面材と心材の接着強度の程度、繊維破断の原因、フェーシング層の損傷、短いスパン長さの乾燥材と吸水材とのたわみの違い等を明らかにした。

2 実験方法

実験に用いたサンドイッチ複合材は昭和飛行機工業社製であり、炭素繊維強化エポキシ樹脂のフェーシング層とアラミドハニカムの心材よりなっている。フェーシング層はトレカ P3211-12 プリプレグの5層 $[(0^\circ/90^\circ)_2/0^\circ]$ よりなっている。T300 炭素繊維および 3631 型エポキシ樹脂より成るこのプリプレグは 180°C でキュアされ、そして樹脂の重量割合は 37% であった。¹⁴⁾ 昭和アラミドハニカム心材(SAH 1/8-3.0)のセルサイズは 1/8 インチ(3.175 mm)、密度は 3 lb/ft³(48.1 kg/m³)である。¹⁵⁾ 各サンドイッチ複合材はりは、長さ 380 mm、幅が 50 mm、および厚さが 13 mm であり、心材の厚さは 12 mm である。

サンドイッチ材試験片をそのまま水中に浸せば試験片端部のハニカム心材へ容易に吸水することは明らかである。しかしながら、通常の使用においてはサンドイッチ材の端部が露出することはなく、心材から吸水すること

† 原稿受理 平成 7 年 1 月 24 日 Received Jan. 24, 1995

* 正会員 京都大学大学院工学研究科機械工学専攻 〒606-01 京都市左京区吉田本町, Dept. of Mech. Eng., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-01

** フランス大使館 〒106 東京都港区南麻布, France Embassy, Minato-ku, Tokyo, 106

Fig. 1. Protection of test piece from water.

Fig. 2. Schematic of three point bending test.

はないと考えられる。そのため、吸水試験用のサンドイッチ材試験片については Fig. 1 に示すように、すべての端面を耐熱テープでシールし、かつ、そのテープの上にシリコン（シリコンは信越化学工業社製の耐水、耐熱 KE-490RTV）をコーティングし、試験片はフェーシング層を通じてのみ吸水するようにした。それらの試験片を 80°C の純水中に浸し、吸水試験を行った。フェーシング層は薄いので、吸水の影響は心材とフェーシング層の両方に現れた。吸水率が 2～6 wt.% のものを曲げ試験に供したが、吸水期間は吸水率が 3～4 wt.% の場合で約 1 ヶ月、6 wt.% の場合で約 4 ヶ月であった。

サンドイッチはりの機械的特性を得るため 3 点曲げ試験を行った。使用したジグを Fig. 2 に示す。鋼のジグは 120 mm から 330 mm までスパン長さを変えられることができ、そして剛性が十分大きいのでジグのたわみは無視できる。試験機は容量が 98 kN の島津オートグラフ AG-10TS であり、0～1.96 kN の範囲で使用した。3 点曲げ試験は、自在継手に接続された試験機の上チャックによって中央の支点が上方へ移動することにより行った。

3 実験結果

3.1 剛性

曲げ試験は ASTM C393-62 標準試験法によって行った。はりのせん断および曲げ剛性は 200, 240, 280 および 330 mm のスパン長さの 3 点曲げ試験から得た。各試験において試験片は十分に降伏強度以下である 400 N まで弾性的に負荷した。3 点曲げ試験において、スパン中央のたわみ d は、

$$d = (Fl^3/48D) + (Fl/4N)$$

によって与えられる。ここで、 F は荷重、 l はスパン長さ、 D はサンドイッチはりの曲げ剛性、 $D = E(h^3 - c^3)b/12L$ (E はフェーシング層の弾性率、 h はサンドイッチはりの厚さ、 c は心材の厚さ、 b はサンドイッチはりの幅、 $L = 1 - \nu$ 、 ν はフェーシング層のポアソン比)、および N はサンドイッチはりのせん断剛性 $N = G(h$

Fig. 3. Flexural and shearing stiffness vs. water absorption ratio for aramid honeycomb core specimens.

+ $c^2b/4c$ (G は心材の有効せん断弾性率) である。

2 つの異なるスパン長さの試験片の同一荷重試験結果から、曲げおよびせん断剛性が得られる。乾燥試験片において、はりの単位幅当たりの各剛性値は、 $D = 196.2 \text{ Nm}^2$ 、 $N = 27.4 \text{ kN}$ であった。吸水試験片に対しても同じ実験を行い、各剛性値を求めた。それらの結果を Fig. 3 に示す。比較し易いように目盛りは各剛性値の最大値と最小値が同じ線図上に収まるように決めた。図からわかるように、6 wt.% の吸水によって曲げ剛性は 4 % の増加を示したが、せん断剛性は 11 % 減少した。

2 ないし 3 週間、室温で乾燥させた吸水試験片を回復試験片と定義する (Fig. 3 中の ○ および ●)。同じ吸水率に対して、これらの回復試験片は吸水試験片よりも乾燥試験片により近い剛性値を示した。回復量はせん断剛性のほうが大きい。これは端面をシールしていたテープをはがして乾燥させたため、フェーシング層よりも心材の方が乾燥しやすくなったためである。

3.2 強度

心材せん断強度およびフェーシング層強度を求めるた

Fig. 4. Maximum facing or core shearing stress vs. span length for aramid honeycomb core specimens.

Fig. 5. Top view of typical facing crack after bending test (Span length=330 mm).

Fig. 6. Facing or core shearing strength vs. water absorption ratio for aramid honeycomb core specimens.

め、本研究では3点曲げ破壊試験を120 mmから330 mmまでスパン長さを変えて行った。その結果をFig. 4に示す。グラフ上の数字は試験片本数を示す。なお、120 mmのスパン長さで負荷された試験片の全長は190 mmであり、380 mmの標準はりを2つに切断して得られたものである。

200 mm以下では、はりには心材の破壊によって破壊した。破壊はスパン中央で心材の中心において幅全面で生じた。破損した部分は小規模であったが、試験中はより広範な部分で各層のせん断変形が観察された。スパン長さが200 mm以上になるとフェーシング層に生じる応力が大きくなり、試験片は圧縮応力を受ける側のフェーシング層から破壊した。

3点曲げ試験では、スパン中央のフェーシング層応力 F と心材のせん断応力 S は、それぞれ、

$$F = Pa/2f(h+c)b, \quad S = P/(h+c)b$$

で与えられる。ここで、 P は荷重、 a はスパン長さ、 f はフェーシング層の厚さ、 h はサンドイッチはりの厚さ、 c は心材の厚さ、そして b はサンドイッチはりの幅である。

Fig. 4からわかるように、フェーシング層の最大応力曲線はスパン長さとともに線形的に上昇するが、外部から観察できるき裂が発生したのは330 mmスパン長さのときだけであったので、本論文では、330 mmスパン長

さでフェーシング層き裂が得られたときを、そのはりのフェーシング層強度と定義した。Fig. 5に典型的なフェーシング層き裂を示す。最大心材せん断応力は120 mmスパン長さにおいて得られたので、その強度を心材せん断強度と定義する。フェーシング層強度、心材せん断強度とも実際の強度はより高い可能性があるが、この論文では乾燥材と吸水材の特性を比較することが目的であるので、そのように定義した。

異なる吸水率の吸水試験片について、フェーシング層強度および心材せん断強度を試験により求めた。その結果をFig. 6に示す。吸水率が0 wt.%の軸上で示すように、乾燥試験片のフェーシング層強度および心材せん断強度は、それぞれ、 $F=373$ MPa、 $S=1.52$ MPaであった。両強度とも吸水率が増えるに従って低下しており、たとえば、3 wt.%の吸水率ではフェーシング層強度は9%、心材せん断強度は18%低下している。

4 破断試験片の巨視的および微視的観察

4・1 光学顕微鏡観察

引張応力を受けたフェーシング層は、顕微鏡観察の結果から外側層において層間はく離を示すものの小規模であり、本研究では、より大きな破壊を生じる圧縮側のフェーシング層を観察した。なお、フェーシング層は表面から心材へ向かって、0°、90°、0°、90°、0°の積層構成になっているが、この順に第1層から第5層へと数えることとする。

光学顕微鏡による巨視的観察写真をFig. 7に示す。き裂とともに層間はく離も観察するため、5層全部にき裂が生じる前に試験を中断した。白く見える層が0°層、黒く見える層が90°層に相当する。

すべてのき裂は試験片の長手方向に直角に生じ、表面から心材へ垂直に進展した。また、大きな層間はく離が圧縮側のき裂の近傍に生じた。フェーシング層と心材の接着は非常に良い耐破壊特性があることが観察された。すなわち、多くの場合、第5層(0°)は心材とはく離することなく破断したが、このことはフェーシング層と心材の接着強度が樹脂マトリックスよりも良好であったことを示している。

多くの場合、圧縮破壊の断面写真には、破断後の破面相互の摩擦によって生じる繊維と樹脂の破片が観察され

Fig. 7. Side view of typical facing fracture after bending test (Span length=330 mm).

た。また、圧縮破壊の巨視的破面には多くの階段状面、すなわち、試験片の長手方向の異なる位置で破断している繊維グループが観察された。これは繊維の微視的座屈による典型的な破壊であり、通例、圧縮における主な破壊様式とされている¹⁶⁾。さらに、曲げたときに 0° 層および 90° 層内に異なる応力が生じることによって引き起こされる大きな層間はく離（たとえばFig. 7中のD部）も観察された。

4・2 SEM観察

Fig. 8に乾燥試験片の第5層のSEM（走査型電子顕微鏡）写真を示す。圧縮破壊した繊維破面上に生じる典型的な座屈軸が見られる。この座屈軸は繊維の圧縮および引張破壊の境界を示す（座屈軸の例をa-aで示す。Cが圧縮側、Tが引張側）。相互に隣接しあった繊維上で観察されるように、き裂は座屈軸に直角に進展している（→印）。破断繊維上の1点から生じた半径方向のすじが見られ、き裂がある繊維から他の繊維へ連続的に進展したことがわかる。破断面内にあるこれら座屈軸の主方向は表面に平行で、破壊は表面から心材へ垂直に進展する。

Fig. 9は2.9 wt.%の水分を含む試験片の第1層のSEM写真である。樹脂の破片、繊維と樹脂のはく離、および繊維の座屈破壊が観察される。乾燥試験片に比べ、より多くの座屈軸が存在している（座屈軸の例をa-a

Fig. 8. Fracture surface of dry specimen (5th ply, 0°).

Fig. 9. Fracture surface of wet specimen (Water absorption ratio=2.9 wt.%, 1st ply, 0°).

で示す。C、Tおよび→印はFig. 8におけるものと同じ意味）。これは、吸水試験片では繊維と樹脂のはく離が促進されてき裂進展が妨げられ、繊維が座屈破壊するためと考えられる。

4・3 SAM観察

120 mm スパン長さの試験片では損傷が観察されなかったのに、損傷が観察された330 mm スパン長さ試験片についての乾燥試験片と吸水試験片のSAM観察結果について述べる。

破断後の乾燥試験片のSAM写真から、試験片の表側にも裏側にも後述のFig. 10に示すような特定の型の層間のはく離が観察された。その層間のはく離はスパンの中央に近ければ近いほど、より大規模であった。異なる深さの面を観察した結果、この層間のはく離の型は心材とフェーシング層の接着部分の形状に関係することがわかった。

Fig. 10に吸水試験片の全層のSAM写真を示す。縦線と横線の集合体からなる白い部分は心材近傍の層間のはく離を示し、また、それ程明瞭ではない多くの白い横線は外側フェーシング層間の層間のはく離を示している。

Fig. 11に示すように、層間のはく離はセルの内側に生じた。低圧下での製造過程によって、セルの壁がフェーシング層の第5層をいくらか傷つけていた可能性がある。バージン試験片のSEM写真で、セル壁下の第5層が大きく押さえつけられていた（Fig. 12）ことはその可能性を示唆している。

5 考 察

Fig. 10. SAM picture through all plies of wet specimen (Water absorption ratio=3.2 wt.%).

Fig. 11. Weakened place of honeycomb core.

吸水によってサンドイッチはりの曲げ剛性がわずかに上昇した (Fig. 3). 通常, 炭素繊維強化エポキシ樹脂の引張剛性は吸水によって若干低下することが報告されており¹²⁾, サンドイッチはりの剛性が吸水によって上昇するか否かについてはその原因を含んでなお検討の要がある.

一方, フェーシング層内および心材内では, はく離を生じる. すなわち, フェーシング層内では繊維-樹脂間の界面ははく離を生じ, 心材内では各アラミド繊維間のはく離を生じる. 心材は繊維の薄い壁でできているセルから成り立っており, 心材せん断強度がフェーシング層の

Fig. 12. Side view of facing layer near core before test.

Fig. 13. Specific facing or core shearing strength of 3.5 wt.% wet specimen to dry specimen vs. span length.

Fig. 14. Load-deflection curves of dry and wet aramid honeycomb core specimens (Span length = 120 mm).

強度よりもより多く水分に影響されると予想される.

Fig. 13に3.5wt.%吸水試験片に対して, スパン長さを120 mmから330 mmまで変えてフェーシング層の強度および心材せん断強度を調べた結果を示す. 図からわかるように, それらの値は乾燥試験片の76%から90%であった. この最小値の76%は試験片が主に心材で応力を受けるときに得られたものであり, それは心材せん断強度がより多く水分に影響されたことを示唆している.

長いスパン長さでは吸水および乾燥試験片の荷重-たわみ線図に相違は観察されなかった. しかし, Fig. 14の荷重-たわみ線図例に示すように, 短いスパン長さ (<200 mm)では同じたわみを生じるのに乾燥試験片の方が吸水試験片より, より大きい荷重を要した. 吸水試験片の心材にはき裂は発生せず, 最大せん断応力に達した後も心材は変形し続け, そして荷重が減少しても大きなたわみがジグを滑らすまでこの荷重を支えた. このこともまた, 心材セル壁のアラミド紙の劣化によるものと考えられる.

フェーシング層では最初, 層間の樹脂にき裂が生じ, それは試験片の幅方向に両端まで進展し, 最後に長手方向の層間にはく離を伴う繊維破断を生じる. このように, フェーシング層では層間にはく離が優先的に生じると考えられる. 完全には破断しなかったいくつかの吸水試験片において, フェーシング層の, より心材に近い部分で層間にはく離が生じていることが観察された. これは, フェーシング層がFig. 12で示されるように心材から部分的に層間にはく離を生じさせるような力を製造時から受けており, そのために圧縮応力が最大の外側層よりも, より心材に近い部分で層間にはく離を生じたものと考えられる.

6 結 論

炭素繊維強化樹脂/アラミドハニカム心材のサンドイッチ複合材の空中保存材と水中浸漬材について曲げ試験を行い, 曲げ強度を調べるとともに破面および試験片内部の損傷をSEMおよびSAMで観察し, 破壊に及ぼす水環境の影響を調べ, 以下のことが明らかになった.

(1) サンドイッチ複合材は6 wt.%の吸水によって曲げ剛性は少し増加したが, せん断剛性は約10%減少した.

(2) 水分はフェーシング層強度よりも心材せん断強度により大きな影響を与えた. たとえば, フェーシング層強度および心材せん断強度は3 wt.%の吸水時にはそれぞれ9%と18%減少した. しかし吸水率が4 wt.%以上では減少が飽和する傾向を示した.

(3) フェーシング層と心材の接着強度は樹脂マトリックスの強度よりも大きい.

(4) 圧縮破壊した破面に観察された座屈軸は, 乾燥試験片よりも吸水試験片においてより多く存在し, 吸水すると繊維がより多く座屈によって破断することがわかった.

(5) フェーシング層のうち, 心材と接する層は製造時に幾分, 損傷を生じている可能性がある.

(6) 長さ200 mm以下の短いスパン長さでは, 同じ荷

重で吸水試験片の方がより大きくたわみを生じたが、これは心材のセル壁の劣化によるものと考えられる。

(平成6年3月17日 日本材料学会第23回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) A. K. Mukhopadhyay and R. L. Sierakowski, J. Comp. Mater., **24**, 382 (1990).
- 2) M. Akay and R. Nanna, Composites, **21**, 325 (1990).
- 3) K. Lingaiah and B. G. Suyanarayana, Proc. of the Society for EXPERIMENTAL MECHANICS, INC, 1 (1991).
- 4) 宮入裕夫, 工業材料, **42**, 12, 64 (1994).
- 5) 駒井謙治郎, 城下莊平, Michiel V. Bruschke, 材料, **36**, 1395 (1987).
- 6) 駒井謙治郎, 城下莊平, 木下 定, 材料, **40**, 341 (1991).
- 7) 駒井謙治郎, 城下莊平, 材料, **41**, 1427 (1992).
- 8) 駒井謙治郎, 城下莊平, 材料, **41**, 1539 (1992).
- 9) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 三木豊吉, 日本機械学会論文集, A-**58**, 830 (1992).
- 10) 駒井謙治郎, 城下莊平, 木下 定, J. Grenestedt, 材料, **38**, 1329 (1989).
- 11) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 木下 定, 小川浩基, 黒田彰夫, 材料, **39**, 271 (1990).
- 12) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 渋谷豊茂, 日本機械学会論文集, A-**56**, 1021 (1990).
- 13) 駒井謙治郎, 箕島弘二, 木下 定, 中野守人, 植松美彦, 日本機械学会論文集, A-**58**, 206 (1992).
- 14) 東レ商品資料, PD-YN3/1991. 11.
- 15) 昭和飛行機工業(株)技術資料, No. 10312.
- 16) L. Shikhmanter, I. Eldror and B. Cina, J. Mater. Sci., **24**, 167 (1989).
- 17) D. Purslow, Composites, **12**, 241 (1981).