CFRP シートにより樹脂を被覆した サンドイッチ複合材料の衝撃値に関する研究

山本達也^{*1} 難波真一郎^{*2} 海老原祥秀^{*1} 西 義 武

東海大学大学院工学研究科金属材料工学専攻

J. Japan Inst. Metals, Vol. 74, No. 2 (2010), pp. 127-130
© 2010 The Japan Institute of Metals

Impact Values of Sandwich Structural Composites of Resins Covered with CFRP Sheets

Tatsuya Yamamoto^{*1}, Shinichiro Nanba^{*2}, Yoshihide Ebihara^{*1} and Yoshitake Nishi

Department of Metallurgical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokai University, Hiratsuka 259-1292

Impact values of sandwich structural composites (CFRP/ABS/CFRP and CFRP/PMMA/CFRP) of both acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and poly methyl methacrylate (PMMA) resins cores covered with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets at both side surfaces were obtained. The impact value of CFRP/ABS/CFRP, which approximately corresponded to that of CFRP composite, was more than two times higher than that of CFRP/PMMA/CFRP. Both the Weibull coefficient (n) exhibiting reproducibly and the lowest impact value (a_0) for safety design were determined as indicators of reliability. Both values of CFRP/ABS/CFRP and CFRP were higher than those of the CFRP/PMMA/CFRP. Thus, the use of ABS resin as the core enhanced the reproducibly and design safety. In addition, since the price of CFRP was higher than that of ABS resin, the sandwich structural composites of CFRP/ABS/CFRP could be used for articles of daily.

(Received August 28, 2009; Accepted November 12, 2009)

Keywords: sandwich structure, carbon fiber reinforced polymer (CFRP), epoxy, poly methyl methacrylate (PMMA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS)

1. 緒 言

炭素繊維強化型ポリマー(CFRP)は高強度かつ軽量なため、航空機の構造材料として使用されている。特に、CFRPはアルミニウムハニカム心材面上に接着被覆されて、サンドイッチ構造複合体とすることで航空機の構造材料として使われている。これにより、軽量化と高強度化を同時に実現しており、耐震補強や高速移動体に応用されている¹⁻³⁾。

本研究室におけるCFRPの衝撃試験結果^{4,5)}から、破壊の起点は数百 μm 深さの表面近傍である可能性が高い。そこで、表面だけCFRPシートで被覆し、サンドイッチ構造体において心材に汎用性樹脂を使用することが可能となれば、高価なCFRP単体に比べてコスト削減が可能となると考えている。一方、近年では高分子材料を心材に用い、CFRPで被覆したサンドイッチ構造体の作製も報告されている¹⁾。しかしながら、この破壊挙動から類推できる程の衝撃試験の結果は未だ見られていない。

そこで、本研究ではCFRPシートで被覆したサンドイッチ複合材料の心材としてアクリルニトリルブタジエンスチレン(ABS)やポリメタクリル酸メチル(PMMA、通称：アクリル)の汎用性樹脂を使用し、その衝撃値を評価することを目的とした。

2. 実 験 方 法

2.1 試料作製

サンドイッチ複合材料の表面材に使用したCFRPシートは厚さ250 μm の梯三菱レイヨン製のクロスプリプレグTR3110 331MPを使用した。CFRPシートの繊維含有率は60 vol%であった。サンドイッチ複合材料の心材に使用した汎用性樹脂は厚さ2 mmの梯セコン三木製のABS樹脂および梯住友化学製のアクリル(PMMA)樹脂を使用した。

CFRP単体はプリプレグを12枚積層させ、サンドイッチ複合材料はプリプレグを樹脂の両表面に1枚ずつ積層させ、成型温度403 K、加熱時間2 hの条件においてオートクレーブ成型を行った。作製した衝撃試験片は80 $\times$ 10 $\times$ 2.5 mmに加工した。

今回作製した試料は、CFRP単体とサンドイッチ複合材料である。以下では、サンドイッチ複合材料はそれぞれ、表面材のCFRPシートで被覆し、心材をABS樹脂としたものはCFRP/ABS/CFRP、心材をPMMAとしたものをCFRP/PMMA/CFRPと定義する。

サンドイッチ複合材料全体の炭素繊維体積率は12 vol%である。つまり、CFRP/ABS/CFRPとCFRP/PMMA/CFRPの繊維含有率はCFRP単体の僅か1/5である。

2.2 シャルピー衝撃試験

シャルピー衝撃試験は、梯島津製作所のシャルピー衝撃試

^{*1} 東海大学大学院生(Graduate Student, Tokai University)

^{*2} 東海大学学生(Undergraduate Student, Tokai University)

験機を使用し, CFRP 単体およびサンドイッチ複合材料の衝撃値を求めた. 試験条件はハンマー重量が 0.86 kg, ハンマーの回転中心から重心までの距離が 0.2102 m, ハンマーの持上げ角度は 132°で行なった⁵⁾.

3. 結 果

本研究では複雑な機構の局部変形がほとんど観察されず, 瞬間的に比較的単純な破壊機構で破壊が生じるため, 衝撃試験結果の整理のためにメディアン・ランク法を用いて破壊確率 P_f を式(1)により算出した⁶⁾.

$$P_f = (I - 0.3) / (N_s + 0.4) \quad (1)$$

式中の I は順序数, N_s はサンプル数である.

Fig. 1 に 2 種類のサンドイッチ複合材料 (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP) のシャルピー衝撃値と破壊確率の関係を示す. なお, CFRP 単体についても同様の試験を行い, その結果を併記した.

$P_f = 0.6$ 以下の低破壊確率において, CFRP/ABS/CFRP は CFRP 単体とはほぼ同程度の衝撃値を示すことを確認した. さらに, $P_f = 0.7$ 以上の高破壊確率では, CFRP/ABS/CFRP の値が CFRP 単体の値を上回っていることも確認できる.

4. 考 察

4.1 CFRP/ABS/CFRP の衝撃値が CFRP 単体より低い理由

CFRP/ABS/CFRP は僅か 1/5 程度という低繊維含有率で CFRP 単体とはほぼ同等の衝撃値を示すことを確認した (Fig. 1 参照). その理由を考察するために, Fig. 2 に各試験片の衝撃試験後における写真を示した. これらの観察結果より, 衝撃値の高い CFRP/ABS/CFRP と CFRP 単体においては, 単純な曲げ破壊であることが観察され, 衝撃値の低い CFRP/PMMA/CFRP で観察される剥離を伴う破壊が全く

認められなかった.

以上のことから, CFRP/ABS/CFRP の破壊機構は二つの破壊機構によるものだと考えられる. 一つ目は, 破壊の起点が深さ 250 μm 以内の表面近傍の CFRP シート層中に存在する機構である. 二つ目は, 界面接着力が強い場合には, 深さ 250 μm の CFRP/ABS 界面近傍で破壊の起点とされる部分での亀裂の発生および進展を抑制することができる機構が考えられる. この二機構のいずれも成立しているため, CFRP/ABS/CFRP の高い衝撃値が説明できる.

一方, CFRP/PMMA/CFRP では表面被覆した CFRP の剥離を伴う破壊が確認された. これは, CFRP/PMMA 界面間の接着力が弱いためである. この界面接着力が弱いと, 応力が界面近傍に集中することで剥離が起き, CFRP 単体の半分以下の衝撃値で亀裂が発生・伝播することにより破壊が生じると考えられる.

以上のことから, サンドイッチ複合材料では CFRP と樹脂の個々の材料の衝撃値だけでなく, 界面接着力も十分に高めれば, CFRP 単体と同程度の衝撃力を得られると考えられる.

4.2 ワイブル係数による衝撃値の再現性の検討

複合材料の信頼性の第一の指標であるワイブル係数を計算し, 再現性(誤差)の度合いを確認した. 同一破壊機構に用いるワイブル分布関数⁵⁾が CFRP およびサンドイッチ複合材料のシャルピー衝撃値にも適用できると仮定し, 式(2)を求め, CFRP およびサンドイッチ複合材料の比較検討を行った⁷⁾.

$$P_f = 1 - \exp[-\{(a_{uc}/a_0)^n\}] \quad (2)$$

式中の a_{uc} はシャルピー衝撃値, a_0 は $P_f = 0.632$ の時の衝撃値であり, n はワイブル係数であり, 再現性の指標である.

Fig. 3 と Table 1 に 2 種類のサンドイッチ複合材料 (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP) と CFRP 単体におけるワイブル分布とそれを線の傾きから計算したワイブル係数を示した. この結果より, CFRP 単体, CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP の順序で高いワイブル係数を示し, 高い再現性を確認した.

さらに, Table 1 に見られる $P_f = 0.632$ の時の衝撃値である a_0 に関し, CFRP/ABS/CFRP の a_0 は CFRP 単体より 10% 高く, CFRP/PMMA/CFRP より 2.6 倍大きな値を示した.

4.3 安全設計用の下限衝撃値の検討

一般的なワイブル分布関数の式では, 低破壊確率時の衝撃値を正確に推定することが困難な場合が多い. そこで, 衝撃試験における下限衝撃値の物理的な意味を, その衝撃値以下の値では, 試料が破壊されないはずの値であると定義し, 次式に示す三母数ワイブル関数を用いることにより, 破壊確率が零の時の衝撃値(下限衝撃値(a_s))を算出した^{8,9)}.

$$P_f = 1 - \exp[-\{(a_{uc} - a_s)/(a_{III})\}^m] \quad (3)$$

a_{III} は三母数ワイブル分布関数における定数で, $P_f = 0.632$ の時の衝撃値である. m は係数である. Table 1 より, CFRP/ABS/CFRP の a_{III} は CFRP 単体より 6% 高く,

Fig. 1 Charpy impact value of CFRP and sandwich structural composites (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP) at each fracture probability.

Fig. 2 Photograph of fractured (a) CFRP and sandwich structural composites ((b) CFRP/ABS/CFRP, (c) CFRP/PMMA/CFRP) samples.

CFRP/PMMA/CFRP より 2.5 倍大きな値を示した。

複合材料の安全設計指標である a_s の計算結果を Table 1 に示す。 a_s の算出は、三母数ワイブル分布関数に a_s の候補値 (a_s) を入れ、プロットとし、その相関係数 F を計算する。 F の値が最大値を示す時を a_s とした。

Fig. 4 に 2 種類のサンドイッチ複合材料 (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP) と CFRP 単体の相関係数 F と a_s の関係を示した。この図の相関係数 F が最大値を示す a_s の値を a_s とした。各試料の F の最大値が 0.96 から 0.99 までの高い値を示した。Fig. 5 に Table 1 に示す a_s の値を

用いた場合のサンドイッチ複合材料 (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP) と CFRP 単体の $\ln(a_{uc} - a_s)$ と $\ln[-\ln(1 - P_f)]$ の直線関係を示す。実験データが良好な相関性を示すことがわかる。

Table 1 と Fig. 4 から、CFRP/ABS/CFRP の安全設計の指標である a_s が高い値を示した。このことより、ABS 樹脂を用いてサンドイッチ複合材料とすることで、材料の安全設計強度が向上する可能性があることを見出した。

Table 1 にはこれらの Fig. 3 から Fig. 5 より求めた信頼性の指標である n, F, a_0, a_{III}, a_s の値を示した。このことより、

Fig. 3 Weibull plots of CFRP and sandwich structural composites (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP).

Table 1 Weibull coefficient (n), correlation coefficient (F), estimated impact values at 0.63 of P_f (a_0 and a_{III}) and the lowest impact value (a_s) of sandwich structural composites of CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP and CFRP.

		n	F	a_0 (kJ·m ⁻²)	a_{III} (kJ·m ⁻²)	a_s (kJ·m ⁻²)
○	CFRP	6.70	0.967	51.5	51.4	4.40
△	CFS/ABS/CFS	4.83	0.982	57.3	54.9	35.6
□	CFS/PMMA/CFS	3.40	0.989	22.0	22.0	0.00

CFRP/ABS/CFRP とすることで, CFRP 単体より, 再現性は低いが, 安全設計の高い衝撃値を示した. 以上の結果より, CFRP/ABS/CFRP は CFRP の代替材料となりうる可能性を見出し, コスト削減の可能性を見出した.

5. 結 論

表面材を CFRP, 心材を汎用性樹脂としたサンドイッチ複合材料を作製し, 衝撃試験を行った. また, 衝撃試験の結果を CFRP と比較検討した. その結果, 以下の点について確認した.

(1) ABS を心材とした CFRP/ABS/CFRP は, $P_f=0.5$ において CFRP 単体と同程度のシャルピー衝撃値を示した. さらに, CFRP/ABS/CFRP のサンドイッチ複合材料の衝撃値は, CFRP/PMMA/CFRP の衝撃値の 2 倍以上である.

(2) サンドイッチ複合材料は, 表面材と心材の界面接着力が衝撃値の向上との密接な関係がある可能性がある.

(3) 再現性の指標であるワイブル係数を計算したところ, サンドイッチ複合材料に比べ, CFRP 単体が最も高く, CFRP/PMMA/CFRP が最も低い.

(4) 安全設計の指標となる下限衝撃値 a_s を求めた結果, CFRP/ABS/CFRP は CFRP 単体や CFRP/PMMA/CFRP よりも高い値を示した.

(5) 以上の結果より, CFRP/ABS/CFRP は CFRP の代替材料となりうる可能性を見出し, コスト削減の可能性を見出した.

Fig. 4 Correlation coefficient (F) against the potential value ($e a_s$) of the lowest impact value (a_s) estimated by using the modified Weibull equation with three parameters. The a_s value is determined at the maximum F value.

Fig. 5 Linear relationships between $\ln (a_{uc} - a_s)$ and $\ln [-\ln (1 - P_f)]$ for CFRP and sandwich structural composites (CFRP/ABS/CFRP, CFRP/PMMA/CFRP).

文 献

- 1) F. Cheng, Q. Q. Ni and N. Iwamoto: J. Soc. Mater. Sci., Japan **54** (2005) 487-493.
- 2) M. Nishihara: Aviat. Eng. Jpn. **642** (2008) 29-34.
- 3) H. Tsukagoshi, Y. Jinno, H. Watanabe and S. Watanabe: Concr. Eng. Jpn. **41** (2003) 29-36.
- 4) A. Mizutani and Y. Nishi: Mater. Trans. **44** (2003) 1857-1860.
- 5) Y. Nishi, K. Inoue and M. Salvia: Mater. Trans. **47** (2006) 2846-2851.
- 6) T. Nishida and E. Yasuda: *Evaluation of dynamic properties of ceramics (in Japanese: Ceramics no rikigaku tokusei hyouka)*, (Nikkan Kogyo Shimbun Sha, Tokyo, 1986) pp. 50-51.
- 7) W. Weibull: *Ingeniörs vetenskaps akademien*, nr. 151, (Generalstabens litografiska anstalts förlag, Stockholm, 1939) pp. 12-14.
- 8) W. Weibull: *Ingeniörs vetenskaps akademien*, nr. 153, (Generalstabens litografiska anstalts förlag, Stockholm, 1939) pp. 16-22.
- 9) Y. Nishi, H. Kobayashi and M. Salvia: Mater. Trans. **48** (2007) 1924-1927.