

炭素繊維強化エポキシ積層板の曲げ疲労

Bending Fatigue of Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Composites

森岡 亮治郎* 富田 恵之** 岩佐 真行***
Kojiro Morioka Yoshiyuki Tomita Masayuki Iwasa

(2002年7月18日 受理)

Carbon fiber-reinforced epoxy laminates were studied to clarify bending fatigue behavior and fracture mechanisms of advanced carbon fiber-reinforced plastic composites. Bending fatigue tests were conducted using a Schenk-type bending fatigue machine at room temperature. The fatigue limit of cross-ply laminates ($[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$) was related not only to compressive stress of laminae composing the laminates, but also to heat generated during fatigue testing. For laminates with high resistance to interlaminar fracture or with high thermal conductivity, the fatigue limit was related to compressive stress of laminae. For laminates with poor resistance to interlaminar fracture, the fatigue limit was dependent on delaminations occurred between adjacent plies of the laminate. The fatigue limit of the quasi-isotropic laminates ($[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_s$) was related to compressive stress of laminae.

キーワード：炭素繊維，高分子系複合材料，疲労，フラクトグラフィ

1. 緒言

先進複合材料と呼ばれる炭素繊維強化プラスチック(CFRP)は比強度・比弾性において鉄鋼材料やアルミニウム合金よりもはるかに優れた特性を持ち、スポーツ・レジャーの分野をはじめ、土木建築分野における補強材、さらには航空機や宇宙構造物の一次構造部材への適用も進んでいる¹⁾。適用分野の拡大にともない、製品の信頼性に対する要求も高まり、特に、輸送機器等では、使用中の繰返し負荷に対する強度は重要な検討課題の一つとなっている。しかしながら、CFRPの破壊過程にはマトリクスの割れ、繊維破断、繊維/マトリクス間の破壊や層間はく離などさまざまな形態が含まれ、その挙動とメカニズムは金属材料等

の均質材料と比較して非常に複雑である^{2)・10)}。疲労強度推定の精度を高め、実際の構造設計やCFRP複合材料の信頼性を向上させるためには、フラクトグラフィなどにより複雑な破壊過程を把握し、データを蓄積することが非常に有効である。本論文では、繊維強度が3.5GPa, 4.5GPa, 5.0GPa, 5.5GPaの4種類のCFからなる積層板(以後3.5-CFRP, 4.5-CFRPなどと称する)の疲労破壊挙動・メカニズムの違い等について検討を行った。

2. 実験方法

供試材には、エポキシ樹脂(東レ(株)製エポキシNo.2500)を母材とし、PAN系炭素繊維(東レ(株)製トレカ)を強化材としたCFRP積層板を用いた。使用した樹脂および繊維の機械的・物理的性質を表1に示す。エポキシ樹脂に炭素繊維(直径6-7 μ m)が一方向に配列されたプリプレグシート(厚さ0.180-0.203 mm)を、

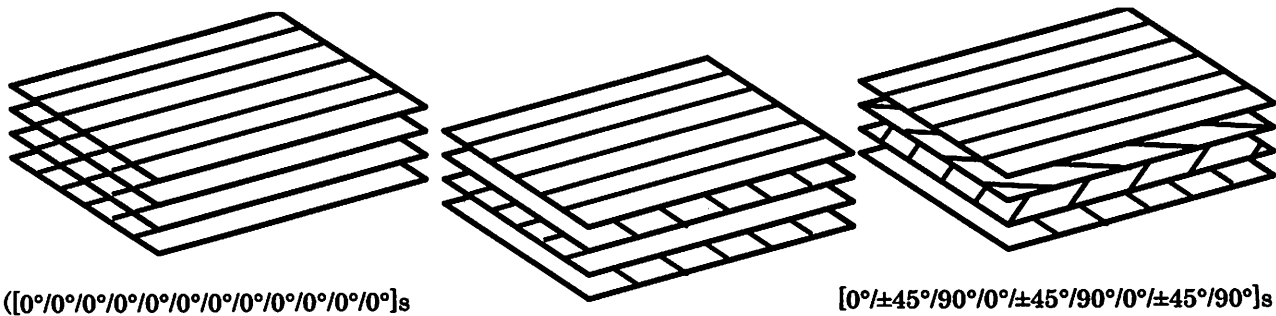
* 評価技術部材料評価グループ

** 大阪府立大学大学院工学研究科

*** 大阪府立大学大学院

表 1 炭素繊維とエポキシ樹脂の機械的性質 (東レ (株) カタログより)
 Mechanical and physical properties of carbon fiber and epoxy resin

	Epoxy resin	Carbon Fiber			
	TORAY Epoxy #2500	TORAY Torayca T300	TORAY Torayca M40J	TORAY Torayca T700S	TORAY Torayca T800H
引張強度	54.9MPa	3.5GPa	4.4GPa	5.0GPa	5.5GPa
弾性率	3.7GPa	230GPa	377GPa	230GPa	294GPa
破断ひずみ	1.7%	1.5%	1.2%	2.1%	1.9%
熱伝導率	0.4W/mK	10.5W/mK	68.5W/mK	10.5W/mK	11.8W/mK



$[[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]]_s$

(a) 一方向積層
 Unidirectional laminate

$[[0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ]]_s$

(b) 直交異方性積層
 Orthographic laminate

$[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]_s$

(c) 疑似等方性積層
 Quasi-isotropic laminate

図 1 積層構成
 Lay-up sequences of laminates

一方向積層(図 1(a)), 直交異方性積層(図 1(b)), 疑似等方性積層(図 1(c))し, 130℃で 2 時間, 圧力 980kPa の硬化条件でホットプレスして厚さ 3.5mm の CFRP 積層板に成形した. 繊維の体積含有率は 65%である. 積層板から幅 10mm, 長さ 100mm の短冊状に小片を切り出し, 中央部両エッジ面に深さ 2mm の V ノッチを加工して試験片とした.

曲げ疲労試験は, 容量 39.2J のシェンクタイプ試験機を用い, 応力比 $R=-1$, 繰り返し周波数 30Hz, 室温(297K)で実施した.

繊維の種類による積層版の基本的特性の違いを把握しておくために, 一方向積層材の引張・圧縮・層間せん断強度を ASTM D3039, D3410, D2344 に準じて測定した. 測定結果を表 2 に示す.

疲労試験中のき裂発生, 進展の観察には SEM を使用した.

3. 結果と考察

(1)各種 CFRP の疲労強度

図 2 に直交異方性積層材の S-N 曲線を, 曲線から得られた疲労限度を図 3 に示す.

直交異方性積層材の疲労限度は, 表 2 に示される一方向積層板の引張強度の順(炭素繊維の引張強度にほぼ比例する)ではなく, 高いものから順に 5.5, 3.5, 5.0, 4.5-CFRP となることがわかった.

図 4 に疑似等方性積層材の S-N 曲線を示す. 曲線から得られた疲労限度を図 5 に示す. 直交異方性積層材と同様に, 疲労限度は炭素繊維の引張強度の順番ではなく, 高いものから順に 5.5, 5.0, 3.5, 4.5-CFRP となることがわかった.

(2)疲労破壊メカニズム

疲労破壊挙動と機構を明らかにするため, 疲労試

表 2 炭素繊維強化複合材積層板の機械的性質
 Mechanical properties of various CFRP laminates.

	3.5-CFRP	4.5-CFRP	5.0-CFRP	5.5-CFRP
引張強度	1.8GPa	2.3GPa	2.6GPa	2.8GPa
圧縮強度	1.37GPa	1.23GPa	1.47GPa	1.57GPa
層間せん断強度	98MPa	88MPa	88MPa	98MPa

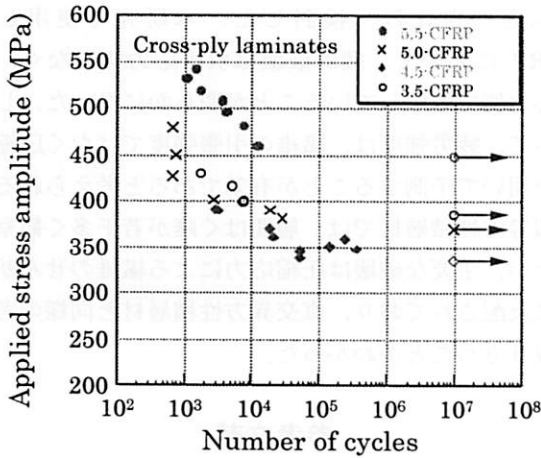


図 2 直交異方性積層材の S-N 曲線

S-N diagrams for various CFRP composites with cross-ply laminates

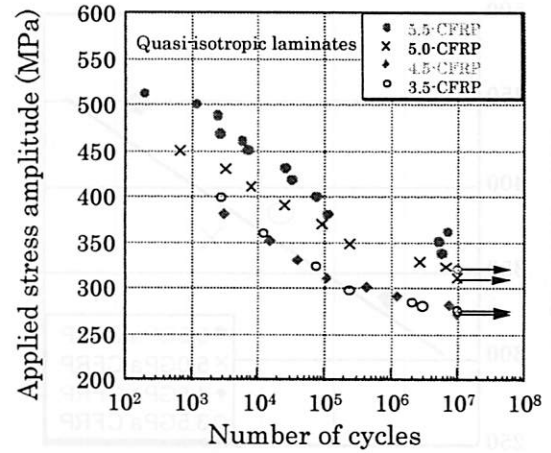


図 4 疑似等方性積層材の S-N 曲線

S-N diagrams for various CFRP composites with quasi-isotropic laminates

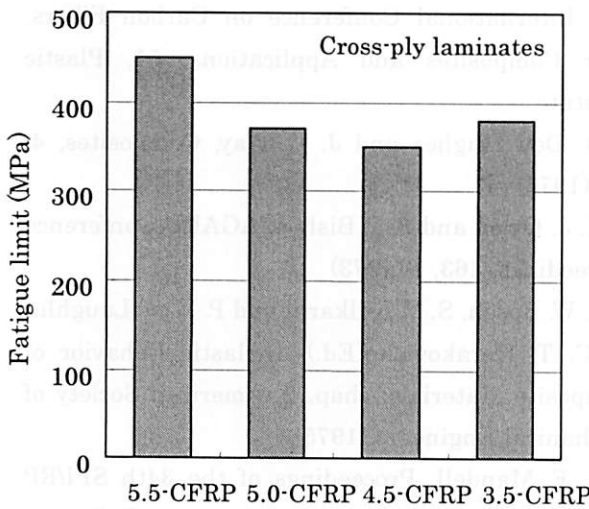


図 3 直交異方性積層材の疲労限度

Fatigue limit for cross-ply laminates.

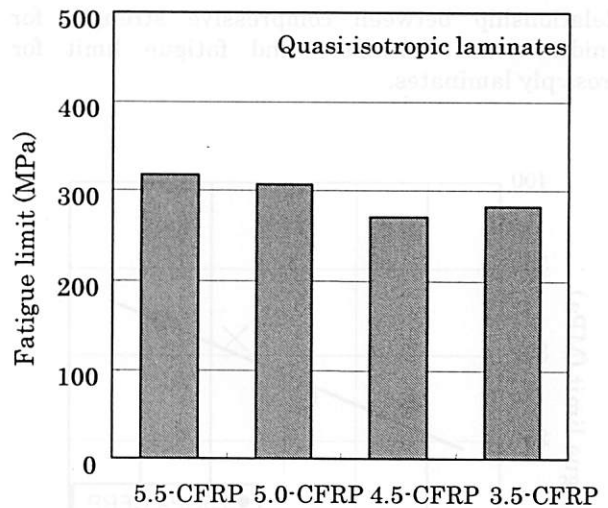


図 5 疑似等方性積層材の疲労限度

Fatigue limit for quasi-isotropic laminates.

験中のき裂発生と進展過程の観察を行った。直交異方性積層材に関しては、疲労き裂は 0°層の繊維破断により発生し、0°層の繊維破断と 90°層の繊維・樹脂界面の破壊により進展した。これらは繊維の種類にかかわらず共通の現象であった。そして、これらの破壊は引張応力ではなく、圧縮応力によるせん断破壊により生じていた。これは、筆者らが既に報告した静的曲げの場合と同様の破壊である¹¹⁾。そこで、図 6 のように疲労限度を一方向積層板の圧縮強度で整理してみると、よい相関を示すことがわかった。5.0-CFRP の値が若干低めであるが、破面を観察したところ疲労試験中に大きな層間はく離が生じており、そのため強度が低下したものと考えられる。この層間はく離は、表 2 に示した一方向積層材の層間せん断強度の低さに起因するものと思われるが、同様に層間せん断強度の低い

4.5-CFRP では層間はく離を生じていない。これは、4.5-CFRP の繊維は高弾性率タイプの繊維を用いており、同じ応力振幅に対して、他の CFRP よりひずみが小さいためであると考えられる。

次に、疑似等方性積層材について考察する。直交異方性積層材の場合と同様に、疲労き裂は 0°層の繊維破断により発生し、0°層の繊維破断と 90°層の繊維・樹脂界面の破壊により進展した。疑似等方性積層材では、ポアソン比の大きな±45°層の影響で層間強度が低下し層間はく離が生じやすいが¹²⁾、破壊は直交異方性材の場合と同様に圧縮応力によるせん断破壊により発生・進展していた。そこで、図 7 に示すように、疑似等方性積層材の疲労強度を一方向積層材の圧縮強度で整理すると、直交異方性積層材の場合と同様に、両者はよい相関を示すことがわかった。

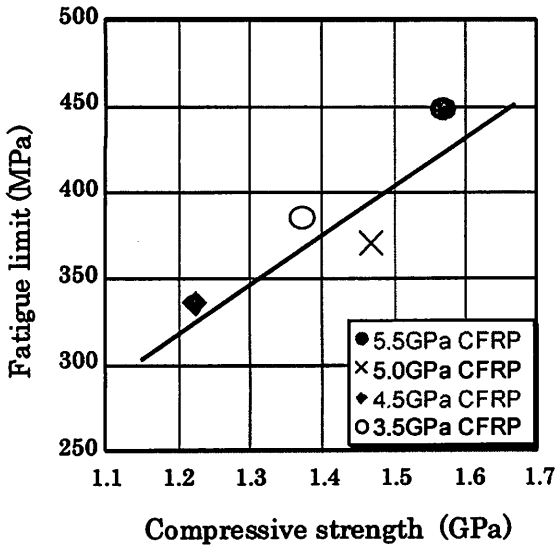


図6 直交異方性積層材の疲労限度と、一方向積層材の圧縮強度の相関
Relationship between compressive strength for unidirectional laminates and fatigue limit for cross-ply laminates.

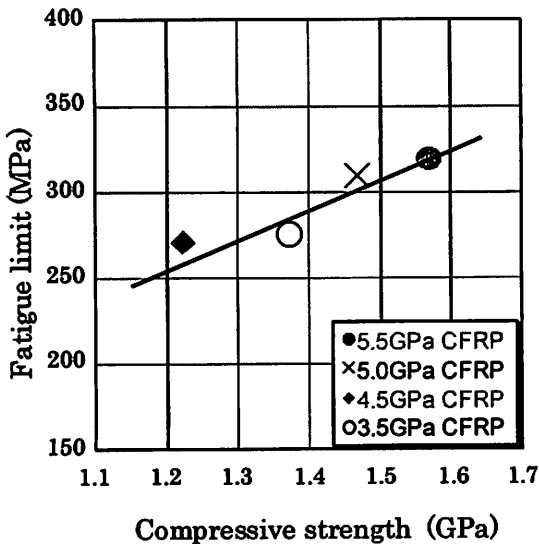


図7 擬似等方性積層材の疲労限度と、一方向積層材の圧縮強度の相関
Relationship between compressive strength for unidirectional laminates and fatigue limit for quasi-isotropic laminates

4. 結言

本論文では、繊維強度の異なる数種類の長炭素繊維強化エポキシ基積層板(CFRP)の曲げ疲労について、その破壊挙動とメカニズムを、フラクトグラフィなど

にもとづき比較・検討した。本研究で使用したCFRPにおいて、疲労破壊は引張応力側でなく、圧縮応力側で破壊していることが明らかになった。したがって、疲労強度は、繊維の引張強度ではなく圧縮強度を用いて予測することが有効であると考えられる。疑似等方性積層材では、層間はく離が若干多く観察されたが、主要な破壊は圧縮応力による繊維のせん断破壊に支配されており、直交異方性積層材と同様の考察が成り立つことがわかった。

参考文献

- 1) ASM Staff Report Adv. Mater. Process, 142, 16 (1992)
- 2) M. J. Owen and S. Morris, Proceedings of the first International Conference on Carbon Fibers, their Composites and Applications, 51, Plastic Institute
- 3) D. Dew-Hughes and J. L. Way, Composites, 4, 167 (1973)
- 4) M. J. Owen and P. T. Bishop, AGARD Conference Proceedings, 163, 1 (1973)
- 5) B. W. Rosen, S. V. Kulkarni and P. V. McLaughlin, in: C. T. Herakovich (Ed.), Inelastic Behavior of Composite Materials, chap. 2, American Society of Mechanical Engineers (1975)
- 6) J. F. Mandell, Proceedings of the 34th SPI/RP Annual Technology Conference, Paper 20-C, Society of the Plastic Industry (1979)
- 7) J. G. Morley, High Performance Fiber Composites, Academic Press (1987)
- 8) A. A. J. M. Peijis, Composites, 24, 19 (1993)
- 9) S. R. Swanson, J. Eng. Mater. Technol., 115, 116 (1993)
- 10) A. Rebecca, A. Couillard and P. Schwartz, Composite Sci. Technol., 57, 229 (1997)
- 11) Y. Tomita, T. Tamaki and K. Morioka, Mater Character., 41, 123 (1998)
- 12) K. Schulte and W. W. Stinchcomb, in: K Friedrich (Ed.), Application of Fracture Mechanics to Composite Materials, Composite Materials Series, 6, 273, Elsevier (1989)