

板曲げ振動疲労試験機を用いた厚肉 GFRP 積層板の繰り返し載荷実験

京都大学大学院 学生会員 ○佐藤 顕彦
京都大学大学院 正会員 五井 良直

京都大学大学院 正会員 北根 安雄
京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

1. 研究背景および目的

近年, FRP は国内においては歩道橋や小型の水門の主構造部材として適用が広がりつつある. 一方で, 海外では道路橋の構造部材としての適用が多く報告されており, 今後わが国でも道路橋部材として採用される可能性がある. しかしながら, 土木構造部材のような大断面を有する積層板について疲労試験が実施された例が少なく, データの蓄積および疲労特性の解明が期待される. そこで本研究では板曲げ振動疲労試験機を用いて厚肉 GFRP 積層板の曲げ疲労試験を実施し, 疲労特性および構造主部材への適用性の評価を試みた.

2. 実験概要

本研究で使用する板曲げ振動疲労試験機は 2005 年に開発され, 主に鋼溶接継手の疲労強度を明らかにする目的で使用されてきた. 図-1 に試験機概念図を示す. 図-1 において供試体は左端で剛結されており, 右端では鋼板を介してばねに支持されている. ばねの位置を調整することで応力比を任意の値に設定することが可能である. 本研究では $R = 0.1$ の条件とし, 引張面での最大応力が静的曲げ強度 (369.7 MPa) の 20% - 40% の範囲で試験を実施した. なお, 静的曲げ強度の算出は JIS K7017 に従い実施した.

供試体の一般図を図-2 に示す. 供試体はハンドレイアップ法により積層されたロービングクロス GFRP 積層板 $[\#0^\circ]_{32}$ から切り出して作製した. 本研究では図-1 のような構造の試験機を使用しているが, 起振器による載荷の際には左端の剛結部で曲げモーメントが卓越する. 疲労試験の際に剛結部での応力集中により過大な応力が発生することを避けるために, 本研究では図-2 のように供試体中央に幅が狭い部分 (以下, 試験区間) を設けた. 試験区間の幅および位置は, 事前に実施した理論計算および FEM 解析から, 試験区間での曲げ応力が左端剛結部の 2 倍以上となるよう決定した. 試験区間の R は JIS K7119 を参考に幅の 2 倍とした.

試験では破断回数に加えて, 載荷回数 500 サイクルごとにひずみ範囲を記録した. ひずみの計測にはゲージ長 5 mm の FLA-5 (東京測器研究所) を用い, 図-2 に示される 4 点の両面で計測を行った.

3. ひずみ範囲履歴および S-N 線図

代表的なひずみ範囲履歴として, ゲージ 2 における最大応力が静的曲げ強度の 30% に相当するケースでの結果を図-3 に示す. なお, 図-3 は引張側の面 (A 面) の結果のみをプロットしており, このケースでは 64,900 cycle で試験区間の AB 両面にわたって層間剥離が発生し, 載荷強度が著しく低下したため載荷を停止している. 図-3 から, A2 および A3 は 40,000 cycle 辺りからひずみ範囲が大きくなっているのに対し, A1 および A4 では破断直前までは

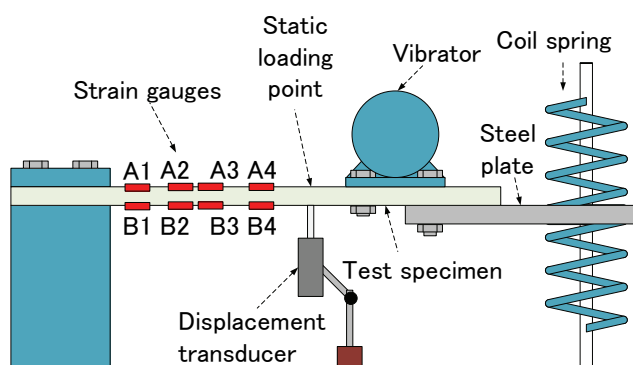


図-1 曲げ振動試験機概念図

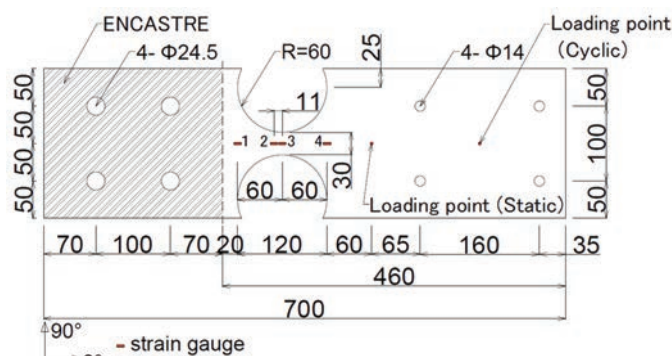


図-2 供試体上面図 (寸法単位: mm)

キーワード GFRP, 疲労, 板曲げ振動疲労試験,

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1-3 棟 257 号室 TEL 075-383-3164

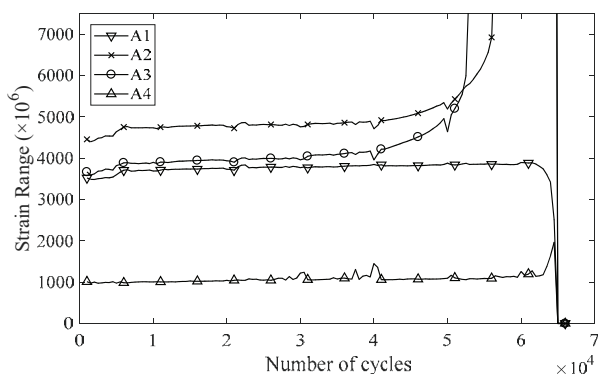
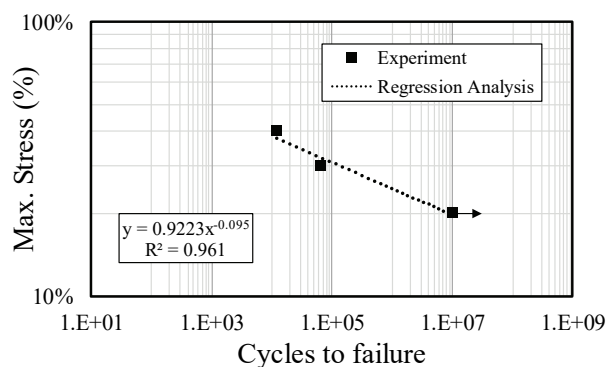
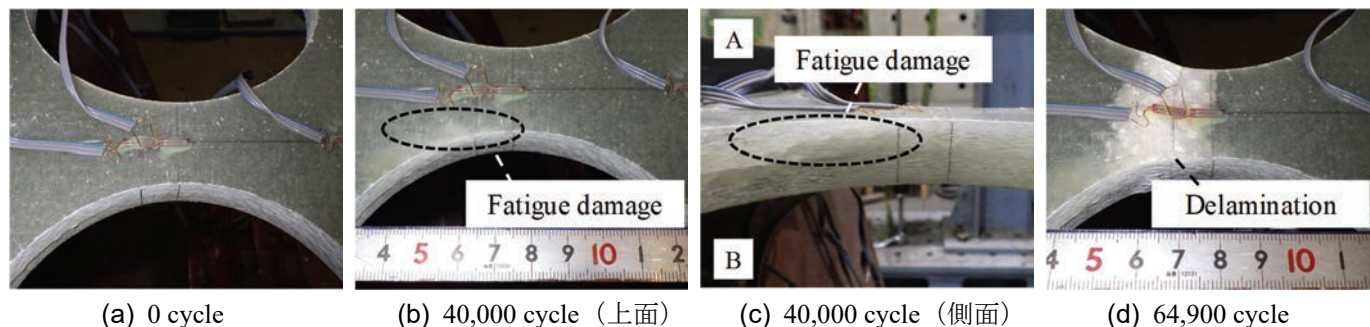
図-3 ひずみ範囲履歴 ($\sigma_{\max}=30\%$)

図-4 S-N 線図

図-5 疲労損傷の目視観察結果 ($\sigma_{\max}=30\%$)

ば一定のひずみ範囲を記録していたことがわかる。圧縮応力を受ける B 面の 4 箇所 (B1~B4) においても同様にほぼ一定のひずみ範囲を維持していた。このことから、試験時に試験区間で発生する GFRP の内部損傷や振動特性の変化が载荷曲げモーメントに与える影響は限定的であり、本手法が GFRP の曲げ疲労試験に適用可能だと考えられる。一方で、曲げ応力が最も卓越する箇所である A2 および A3 では、载荷に伴い、樹脂内亀裂や層間剥離が進展し、ひずみ範囲が徐々に増加したと考えられる。さらに、使用したひずみゲージ自体も繰り返し载荷により損傷し、50,000 cycle 付近で急激にひずみ範囲が増加したものと推測される。

実験から得られた S-N 線図を図-4 に示す。図-4 の縦軸は静的曲げ強度に対する最大応力の比で示しており、最大応力は A2 における 0 cycle 時の最大ひずみに弾性係数を乗じて算出した。試験数については今後増やしていく予定だが、現時点で 10^7 回疲労限度は静的曲げ強度の 20% (75 MPa) であることが確認された。ロービングクロス GFRP の引張疲労については既往のデータ²⁾で静的強度の 22%が 10^7 回疲労限度であることが報告されており、本研究の疲労限度が引張疲労限度と比べて僅かに低い結果となっていることがわかる。薄肉積層板の引張と厚肉積層板の曲げとの間の疲労損傷挙動の違いは今後も検討していく必要がある。

4. 内部疲労損傷の分布

試験中に载荷を一時停止し、外観目視により疲労損傷の分布を調査した。結果を図-5 に示す。図-5(b)から、载荷回数の増加に伴い、R 端部から白色の損傷域が発生していることがわかる。この損傷は既往研究³⁾でも報告されており、微細な樹脂内亀裂や層間剥離に光が反射することで白く見えるとされている。上面から確認できる損傷域は载荷回数の増加に伴い徐々に拡大し、64,900 cycle において図-5(d)のように試験区間全体に急激に拡大した。一方で、図-5(c)の側面図からは、中立軸から A 面にかけて樹脂内亀裂が分布していることが確認でき、疲労損傷は圧縮面より引張面で発生しやすいと推測される。このことは、図-3 において引張を受ける A2 および A3 のひずみが徐々に増加したことと一致する。さらに、図-5(c)から樹脂内亀裂は A 面表面より僅かに中立軸に近い位置で発生していることがわかる。したがって、引張応力に加えてせん断応力が疲労損傷に寄与している可能性が考えられる。

参考文献 1)Siwowski et.al.:Composite Structures, 192, pp. 555-567, 2018. 2)強化プラスチック協会:FRP 構造設計便覧, pp. 36-40, 1994. 3)前川ら:材料, 35 巻, 393 号, pp. 636-641, 1985.