

(29) ロービングクロスGFRPの疲労強度および繰り返し载荷に伴う剛性低下の評価

佐藤 顕彦¹・北根 安雄²・日比 英輝³・五井 良直⁴・杉浦 邦征⁵

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:sato.akihiko.45m@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:kitane.yasuo.2x@kyoto-u.ac.jp

³正会員 株式会社ヒビ (〒503-1337 岐阜県養老郡養老町直江613-1)
E-mail:hidekey@hibi-fip.co.jp

⁴正会員 京都大学大学院助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:goi.yoshinao.2r@kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 京都大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail:sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

本研究では、ロービングクロスGFRPの引張疲労試験を実施し、疲労強度や繰り返し载荷に伴う剛性低下性状について調べた。試験の結果、GFRPの疲労強度はS-N曲線により定義でき、疲労限/静的強度比が35%であることが明らかになった。また、繰り返し载荷初期に急激な剛性の低下を生じ、その後は緩やかに減少し、破壊に至ることが分かった。さらに、既往の剛性低下モデルを用いてロービングクロスGFRPの静的な剛性の低下を再現することを試みた。解析の結果、疲労破壊したケースについてはモデルで使用する定数を変更することで剛性の低下を精度よく再現することが可能であった。一方で、疲労限以下の応力範囲を受けるケースについては既往のモデルでは、剛性の低下を再現することが困難であるが、適切な安全率を設定することで供用中の剛性を担保できる可能性を示した。

Key Words : GFRP, Fatigue, Maintenance, Stiffness degradation

1. はじめに

GFRP は鋼材やコンクリートなどの従来の材料と比べて比強度が高く、耐腐食性にも優れており、近年では補修補強用材料としてのみではなく、水門、橋梁用検査路、歩道橋などの構造用部材としても利用されている¹⁾²⁾。さらに、国外においては道路橋への採用実績も増えつつあり、ブルガリアで1981年にGinzi橋が建設された³⁾のを皮切りに、1990年代中盤にはGFRP桁を使用した橋長9.1 m～11.9 mの道路橋が米国的高速道路で採用されている⁴⁾。近年でも全ての部材にGFRPを使用した橋長10.0 mの道路橋の構造特性がFEM解析と現場実験で検討されており⁵⁾、このような海外での事例を参考に今後は国内においてもGFRPが道路橋の主構造部材として採用される可能性があると考えられる。

GFRPを活荷重の大きい道路橋へ適用する際には疲労に対する検討が必要である。GFRPの疲労強度の評価には鋼材と同様にS-N曲線が用いられるが、鋼材のように明確な疲労限が現れないため繰り返し数が 10^7 回となる応力範囲が疲労限として定義されることが多い。既往の研究成果⁶⁾から種々の積層構成に対するS-N曲線が示されているものの、土木構造材料として用いられるGFRP積層板の疲労試験を実施した例は少ない。

さらに、繰り返し载荷を受けるGFRPは疲労損傷として材料中に微細なき裂が増加し、それに伴い剛性が低下することが知られている⁷⁾。図-1の概念図に示されるように、GFRPの剛性低下は疲労寿命をRegion I, II, IIIの3段階に分類して表現される⁸⁾¹²⁾。Vassilopoulosら⁸⁾によると、Region Iは破断繰り返し数 N_f に対して約10%以下の繰り返し数にあたり、急激な剛性低下を生じる。そ

の後剛性は緩やかに減少を続け、最終的に Region III で再び急激な剛性低下を生じ疲労破壊に至る。GFRP の剛性低下を表現する試みはこれまで数多く実施されており、特に Wu らの剛性低下モデル⁹⁾は疲労寿命全体の剛性低下を表現しているうえ、パラメータの数が比較的少なく、実用上有利であると考えられる。しかしながら既往の研究ではロービングクロス GFRP に対して Wu モデルの適用性を検討した例が少なく¹⁰⁾、また橋梁設計に用いられる静剛性について剛性低下モデルが適用可能であるかが不明である。さらには、Wu らも含めて既往の研究では疲労破壊を生じる場合を対象としており、疲労限以下の载荷応力を受ける GFRP の剛性低下性状が明らかでない。

そこで、本研究では土木構造物で用いられるロービングクロス GFRP 積層板を対象に引張疲労試験を実施し、S-N 曲線や剛性低下性状を明らかにした。さらに実験で計測された静剛性の低下に対して Wu モデルが適用可能であるかを検討した。

2. 実験方法

本試験で用いた材料はハンドレイアップ成形法で作製されたロービングクロス GFRP である。積層板の構成と材料物性を表-1 に示す。表-1 の材料物性は JIS K7164¹³⁾に従って 5 体の材料試験を実施して求めた。疲労試験体は積層板から 250mm×25mm の寸法で切断し、両端のつかみ部分を 50mm×25mm×2mm のアルミタブで補強して、図-2 のように作成した。

疲労試験は JIS K 7083¹⁴⁾と ASTM D3479¹⁵⁾を参考に荷重制御で行った。载荷最大応力 σ_{max} ごとの試験体数を表-2 に示す。応力比は 0.1 の片振り引張疲労とし、载荷周波数は 10 Hz とした。試験機には動的疲労試験機（島津製作所サーボパルサ、最大荷重 50 kN）を用いた。試験は室温環境で実施したが、試験体に設置した熱電対から疲労試験中の試験体温度が 40℃を超えないことを確認している。

試験では荷重と破断までの繰り返し数 N_f を計測するとともに、繰り返し数の増加に伴う弾性係数の変化を記録した。弾性係数は応力ひずみ関係のひずみが 500×10^{-6} から 2500×10^{-6} における傾きを用いて算出した。応力-ひずみ関係の計測にあたっては、疲労試験開始前および任意の繰り返し数で载荷速度 1 mm/min 以下の静的载荷を行った。ひずみの計測にはひずみゲージ（東京測器研究所、FLA-5）、アクチュエーターの変位、伸び計（東京測器研究所、EDP-5B-50）を用いてそれぞれの結果を比較した。

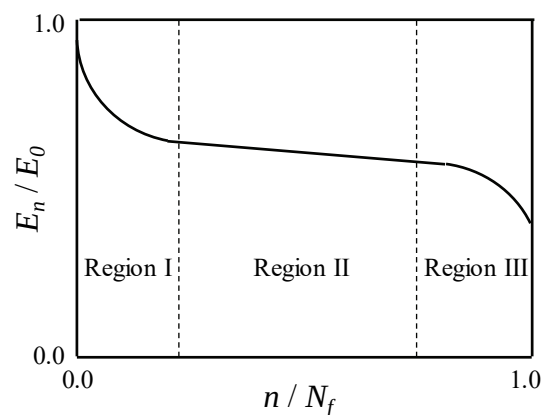


図-1 疲労による剛性低下の概念図

表-1 材料物性値

Fiber	Woven roving glass fiber
Resin	Unsaturated polyester
No. of ply	4
Thickness	2.057 mm
Fiber volume ratio: V_f	42.7%
Tensile strength: σ_u	281.1 MPa
Elastic modulus: E	22.31 GPa

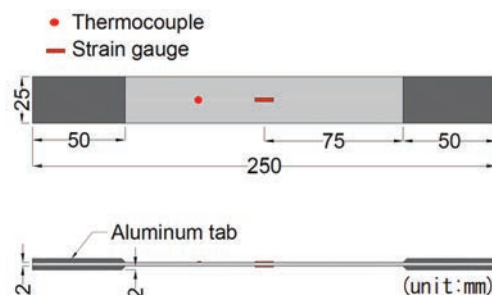


図-2 試験体上面図（上）と下面図（下）

表-2 試験体数と破断繰り返し数

σ_{max}/σ_u	No. of cases	N_f (X1000)
90%	2	2
70%	2	21 ~ 30
60%	3	54 ~ 85
50%	3	224 ~ 612
40%	3	1,932 ~ 6,332
35%	1	10,000
30%	1	10,000
sum	15	

3. 実験結果

(1) S-N曲線

疲労試験の結果得られた破断繰り返し数 N_f を表-2 に、S-N 曲線を図-3 に示す。図-3 の縦軸は载荷最大応力 σ_{max}

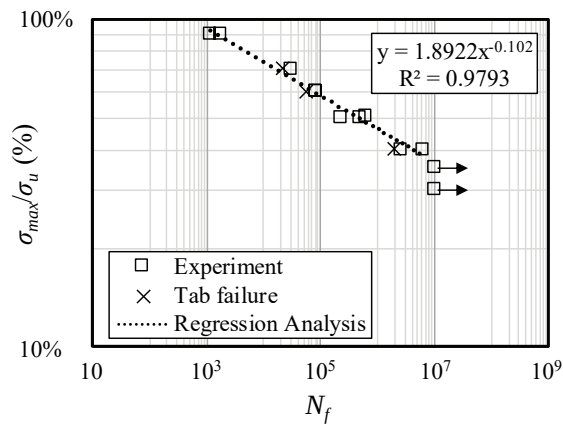


図-3 S-N 曲線

の静的引張強度 σ_u に対する比で整理している。図-3は全15体の試験結果をプロットしているが、一部は 10^7 回で疲労破壊を生じないものやタブ破壊を生じるものがあり、それらは横矢印と×印で示すとともに近似曲線の算出から除外している。実験した範囲ではS-N曲線は両対数グラフ上で直線とみなすことができる。また、 10^7 回まで曲線は減少を続けており明確な疲労限が現れなかった。一般にFRPの場合は 10^7 回を疲労限とし、これ以上の繰返しは行わないことが多い。

10^7 回疲労限となる最大応力 σ_{max} と応力範囲 $\Delta\sigma$ について文献値⁹⁾との比較を表-3に示す。文献では平織および朱子織ロービングクロスを対象としており応力比0の試験条件での結果をまとめている。表-3から本研究で対象とした積層板は文献値の範囲内でも比較的高い疲労限を有していることがわかる。

(2) 疲労損傷の進展性状

繰返し数の増加に伴う疲労損傷の進展性状を確認するため、透過光を用いた目視観察と顕微鏡による観察を行った。目視による観察結果を図-4に示す。図-4に示される試験体は $\sigma_{max}/\sigma_u = 60\%$ 、 $N_f = 54,000$ であり、図中の数字は撮影時の繰返し数を表す。図-4からGFRP積層板には疲労破壊が生じるまで目視で確認できるような単一のき裂が生じなかったことがわかる。試験中に目視で確認された変状としては、繰返し数1,000回の段階で試験体の縁の部分で透過光に影が生じ、繰返し数の増加に伴い影が見られる範囲が鋸刃状に拡大していった。50,000回の段階では試験体全域で透過光の明るさが小さくなり、その後繊維破断を生じることで疲労破壊が生じた。一般にFRPの疲労損傷は単一のき裂進展ではなくき裂の飽和や層間剝離によって進展することが知られており、本研究でも同様の傾向が透過光に影が生じることで確認された。なお、透過光を用いない場合は影の部分が白化として観測され、繰返し数の増加と共に白化部分

表-3 GFRP 疲労限の文献値との比較

		This study	JRPS ⁹⁾
Fatigue limit	σ_{max} (MPa)	98.4	47.1 - 109.8
	σ_{max}/σ_u	0.35	0.22 - 0.36
	$\Delta\sigma$ (MPa)	88.0	47.1 - 109.8
	$\Delta\sigma/\sigma_u$	0.31	0.22 - 0.36

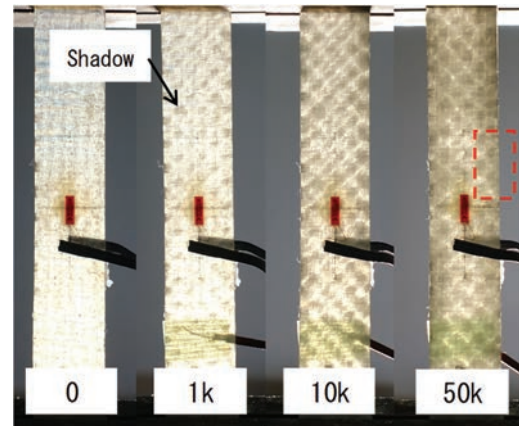
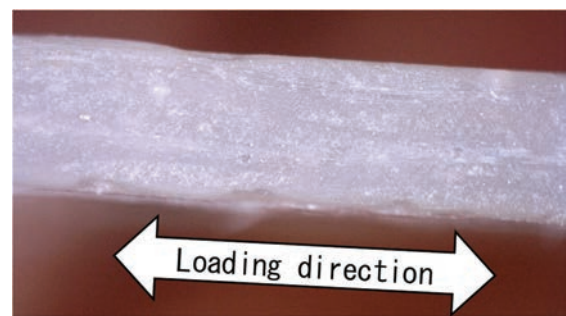
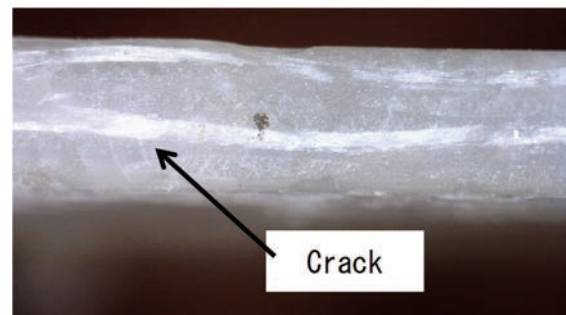


図-4 繰返し数に対する外観の変化 ($N_f = 54,000$)



(a) 0回



(b) 10,000回



(c) 50,000回

図-5 図-4の赤枠部断面の拡大図

が鋸刃状に拡大していく様子が確認された。

図4中の赤枠部断面の顕微鏡拡大写真を図5に示す。図5を見ると、繰返し数 10,000 回においてロービングクロスの荷重方向に直交する繊維束内（以降、横繊維束と表記）で微細なき裂が確認された。繰返し数の増加に伴って横繊維束内の微細なき裂の数は増加していった。50,000 回では横繊維束内のき裂に加えて層間剥離が発生していた。この段階でもき裂が縦繊維束を切断することはなかった。竹村ら⁷⁾は平織 CFRP の引張-引張疲労試験を実施し、疲労寿命が長い場合の損傷進展性状を以下のように報告している。

- 1) 横繊維束内に荷重に対して垂直方向にき裂が発生
- 2) 繰返し数の増加と共に横繊維束内のき裂が増加
- 3) 横繊維束内のき裂が縦繊維束との界面に到達し、凝層間剥離を形成

このような疲労損傷の進展性状は GFRP を用いた本研究でも観測された。以上のことから、強化材として織物を用いた場合の疲労損傷は強化繊維の種類によらず同様の進展性状を示すと考えられる。

(3) 繰返し数の増加に伴う剛性低下

既往の研究では、FRP の疲労試験において、繰返し数の増加に伴い剛性低下が生じることが数多く報告されているが、剛性の定義は研究によって異なり、疲労試験中の応力-ひずみ線図を対象とする事例も存在する¹²⁾。本研究で対象とする GFRP は道路橋等の土木構造物に適用されることを想定している。道路橋示方書・同解説¹⁶⁾では鋼橋に必要な剛性の照査として衝撃を含まない活荷重に対するたわみを使用しており、GFRP を道路橋に適用する場合も活荷重を静的荷重と捉えて同様の照査を実施する必要があると考えられる。そのため本研究では静的弾性係数を剛性と定義して議論を行う。

疲労試験中の残存剛性の変化の一例として、図4と同じ試験体の繰返し数 n と剛性 E_n の関係を図6に示す。

図6にはひずみゲージ (E_{gauge})、アクチュエーターの変位 (E_{disp})、伸び計 (E_{ext}) から算出された結果をプロットしている。ここで E_{disp} の算出には変位を治具間距離で除して得られたひずみを使用し、初期剛性が E_{gauge} と一致するように補正している。図6から、 E_{gauge} では最も急激に剛性が低下し 10,000 回では剛性が 0 GPa となっている。これは疲労試験中のひずみ振幅が約 3900×10^{-6} であり、ひずみゲージの接着層が急速に疲労限界を迎えたためである。図6の結果から GFRP の疲労試験において通常のひずみゲージを使用する場合は、耐久性の高い接着剤を用いる必要がある。 E_{disp} と E_{ext} を比較すると両者はほぼ一致しているが、1,000 回以上の領域では E_{disp} が線形に低下する一方で E_{ext} は多少

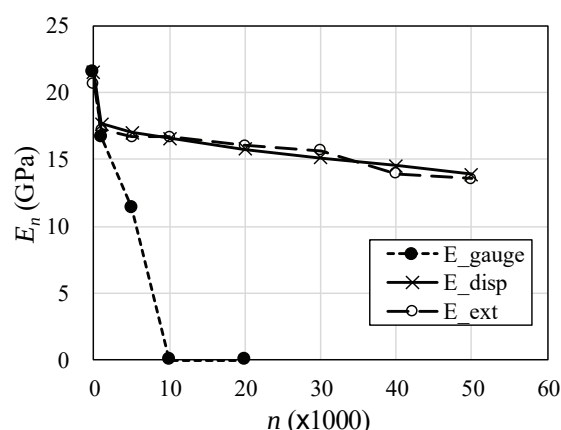
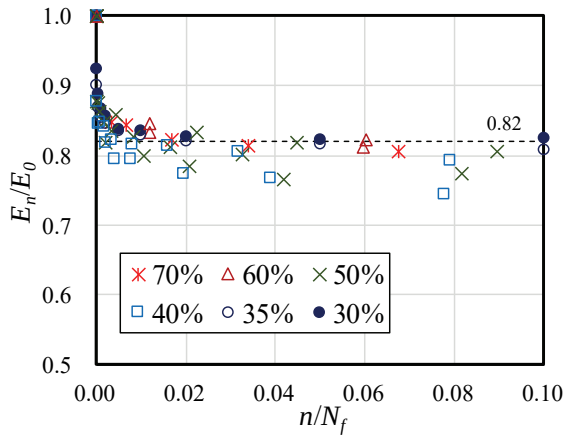


図6 残存剛性の代表例（最大応力 60%, $N_f = 54,000$ ）

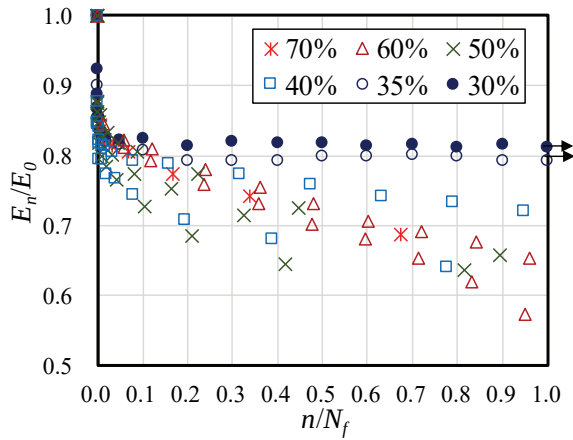
傾きがばらつきながら低下していた。この領域は Region II に相当し、既往の研究¹¹⁾では繰返し数に対して線形に剛性低下を生じるとされる。本研究の実験では疲労試験中は伸び計を取り外しており、静的載荷前に伸び計を設置した。その際に伸び計の設置方向に誤差が生じ結果に現れたものと思われる。以下では試験機の変位から算出された剛性を用いて考察を行う。

繰返し数の疲労寿命に対する比 n/N_f と残存剛性の初期剛性に対する比 E_n/E_0 の関係を図7に示す。図7ではタブ破壊を生じたものを除く全てのケースをプロットしており、凡例は各ケースの最大応力 $\sigma_{\text{max}}/\sigma_u$ を表す。なお、最大応力 30%と 35%は 10^7 回まで疲労破壊を生じないものであったが、ここでは $N_f = 10^7$ 回として整理している。図7(a)から繰返し数が少ない時に急激な剛性低下を生じることがわかる。この範囲は図1の Region I に相当すると思われる。前節で述べたように強化繊維に織物を用いた CFRP と GFRP では疲労寿命初期に横繊維束内に荷重方向に垂直なき裂が増加する。竹村ら⁷⁾は CFRP の場合は横繊維束内のき裂の飽和と共に剛性低下を生じると報告しており、本研究において Region I で生じた剛性低下も横繊維束内に生じたき裂が原因と考えられる。また前節では、横繊維束内のき裂飽和に続く現象として層間剥離が生じると述べたが、この層間剥離を Region II を特徴づける損傷とすると、Region I から II に移行する段階においては横繊維束内のき裂は飽和しており、残存剛性は最大応力によらず一定であると考えられる。図7(a)をみると実際に $n/N_f < 0.10$ で E_n/E_0 は最大応力によらず 0.82 まで急激に低下し、その後緩やかに減少していった。しかしながら同じ最大応力の試験体間でもばらつきがあり、Region I から II へと移行する繰返し数については規則性を見出すことができなかった。

$n/N_f > 0.10$ の範囲に着目すると、図7(b)から疲労限以下の応力とそれ以外で剛性低下の特徴が大きく異なることがわかる。最大応力が疲労限以下の場合、 $n/N_f > 0.10$



(a) 疲労寿命に対して 10%以下の繰返し数



(b) 疲労破壊まで

図-7 全ケースの残存剛性

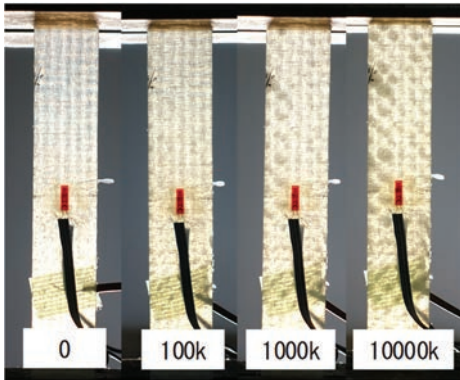


図-8 10⁷回まで疲労破壊しなかった試験体の外観

での剛性低下はほとんど生じなかった。最大応力 30%と 35%の繰返し数 10⁷回における E_n/E_0 はそれぞれ 0.81, 0.79 であった。これは $n/N_f = 0.10$ に相当する繰返し数 10⁶ 回での値 0.82, 0.81 から僅かに減少した値である。図-8 に示される $\sigma_{max}/\sigma_u = 35\%$ での繰返し数に対する外観の変化を見ると、10⁷ 回でも縦繊維束と横繊維束の交差部分で僅かに影が生じているのみであった。このことから疲労限以下の最大応力の場合は $n/N_f > 0.10$ における層

間剥離の進展が限定的であり、剛性の低下もほとんど生じなかったと考えられる。

一方で、疲労破壊を生じたケースでは $n/N_f > 0.10$ の範囲で剛性が線形に低下し続け、初期剛性から 30%~40% 低下した後に疲労破壊を生じた。横軸を n/N_f で整理した場合の剛性低下の傾きが異なる最大応力間で一つにまとまらず、最大応力の大きさに依存しているようにも見られない。また、疲労破壊を生じる残存剛性と最大応力との間には相関関係が見られなかった。この原因として、本研究の方法では Region III での剛性低下を計測できなかったことが挙げられる。既往の研究^{8)~11)}では GFRP の剛性低下は図-1 のように 3 段階に分けられ Region III では急激な剛性低下を生じるとされているが、本研究ではそのような傾向を確認できなかった。これは Region III が破断直前のごくわずかな繰返し数に相当するためであり、本研究のように任意の繰返し数で静的载荷を行い残存剛性を評価する方法では、事前に破断繰返し回数 N_f がわからないことから、短い間隔で静定载荷を行う必要があり、今回の計測間隔では Region III での剛性低下傾向をとらえることができなかった。Region II から III へと移行する繰返し数やその計測方法については今後も検討の必要がある。

4. 剛性低下モデルの適用性の検証

(1) モデル概要

疲労寿命全体の剛性低下性状を表現できるモデルとして、ここでは Wu ら⁹⁾が提唱したモデル（以下、Wu モデルと呼称する）の適用性を検討する。Wu モデルは疲労損傷による剛性低下をダメージ変数 $D(n)$ を用いて表現することを試みた。モデルではダメージ変数 $D(n)$ を繰返し数 n の関数として次式で定義している。

$$D(n) = \frac{E_0 - E_n}{E_0 - E_f} = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^B \right\}^A \quad (1)$$

ここで E_0 : 初期剛性, E_n : 繰返し数 n での残存剛性, E_f : 疲労破壊時 N_f での剛性, A, B : 定数であり, $D(0) = 0, D(N_f) = 1$ である。 $x = n/N_f$ とするとダメージすなわち疲労損傷の進展速度は次式で表される。

$$\frac{dD}{dx} = A \cdot B x^{B-1} (1 - x^B)^{A-1} \quad (2)$$

ここで、は疲労損傷の進展速度が $0 < x_1 < x_2 < 1$ で同じであると仮定し、 A と B の関係として次式を導いている。

$$A = 1 + (B - 1) \frac{\log \frac{x_1}{x_2}}{\log \frac{1 - x_2^B}{1 - x_1^B}} \quad (3)$$

さらに(3)式から A と B との間に次式のような線形関係を仮定した。

$$A = pB + q \quad (4)$$

上式 p , q は定数であり、文献では複数の実験結果から統計的に算出した値としてそれぞれ 0.67, 0.44 であったと報告している。また B の算出には次式を提案している。

$$B = k \frac{\log N_f}{(1-R)(\sigma_{max}/\sigma_u)} \quad (5)$$

ここで、 R : 応力比, k : 定数であり、実験値として $k = 0.06$ を提案している。このように Wu らのモデルでは単一の実験定数 k を求めることで疲労寿命全体の剛性低下を表現できる点で他のモデルより優れている。なお、繰り返し数 n における残存剛性は式(1)を変形して次式となる。

$$E_n = E_0 - D(n)\{E_0 - E_f\} \quad (6)$$

本研究では、 E_0 には各試験体で計測された初期剛性を使用した。一方で E_f については既往の研究から得られた実験式から推定した。

増田¹⁷⁾はロービングクロス GFRP の疲労試験における残存剛性と残存強度の関係を調査し、以下のような実験式を提案した。

$$\frac{1}{E_n} = \alpha + \beta \frac{1}{\sigma_f} \quad (7)$$

ここで、 σ_f : 残存強度, α , β : 定数である。増田は実験結果を kgf/mm-ply の単位で整理しており、MPa に換算すると α , β はそれぞれ 3.44×10^5 , 1.25×10^2 となる。本研究では残存強度が最大応力に等しい時に疲労破壊が生じると仮定し、式(7)を変形し疲労破壊時の剛性として次式で算出された値を用いた。

$$E_f = \frac{\sigma_{max}}{\alpha \cdot \sigma_{max} + \beta} \quad (8)$$

(2) モデル適用性の検討

本研究の実験で得られた残存剛性と(1)で説明したモデルとの比較の例を図-9に示す。図-9から分かるように、Wu モデルと本研究の実験結果との間では剛性低下に差が見られた。モデルでは $n/N_f < 0.20$ の剛性低下を過小評価しており、逆に $n/N_f > 0.20$ では剛性低下を過大評価していた。この傾向は最大応力の大きさによらず全てのケースで確認された。Wu モデルは GFRP, CFRP 双方の様々な積層構成について既往の文献から得られたデータに基づいて実験定数が定められている⁹⁾。また、Yadav¹⁰⁾は平織ガラス繊維とエポキシ樹脂を用いた GFRP について Wu モデルの適用性を検討し、モデルと実験結果

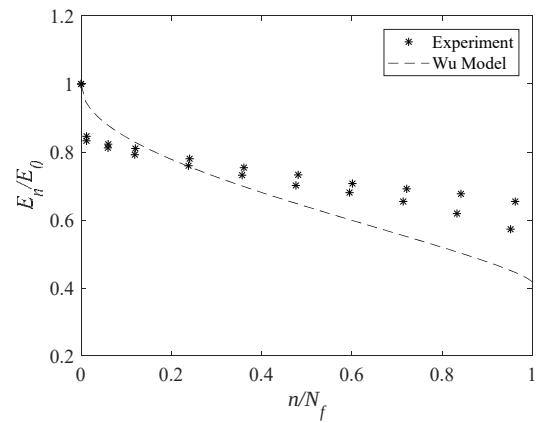


図-9 実験値とモデルとの比較 ($\sigma_{max}/\sigma_u = 60\%$)

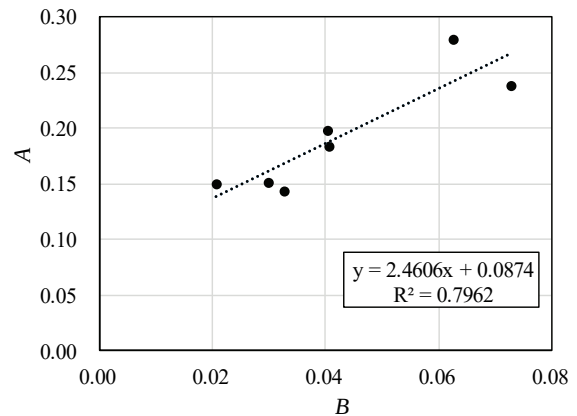


図-10 解析により得られた AB 間の関係

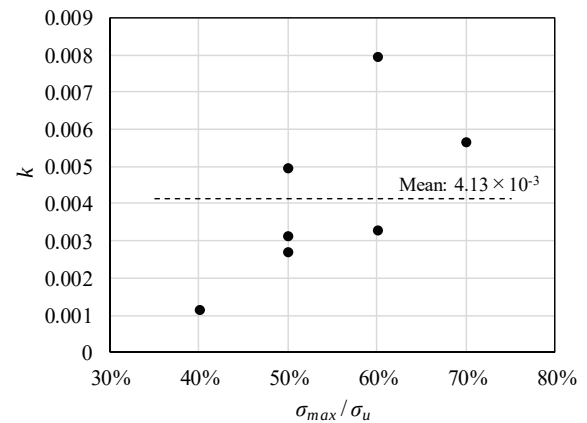
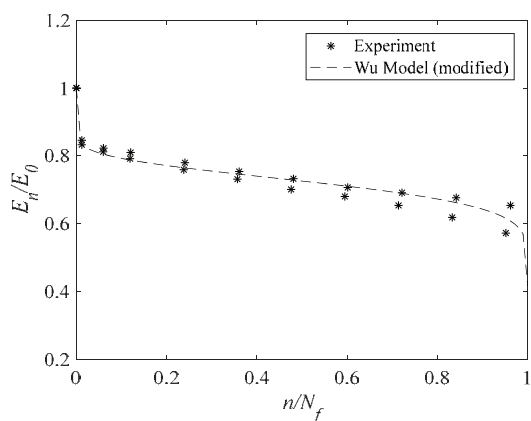


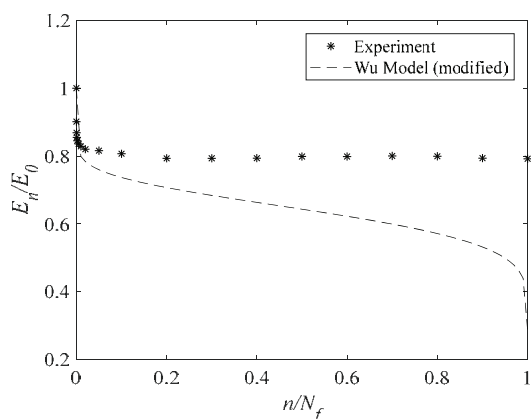
図-11 実験定数 k の計算結果

との間に多少の差異が見られるものの実験値間のばらつきよりは小さかったと報告している。本研究で実験値と適合しなかった原因としては、供試体の樹脂に不飽和ポリエステルを用いていることや、本研究では静剛性を対象としていることが挙げられる。

そこで本研究で対象とする静剛性についても Wu モデルを適用させるため、モデルに用いられる実験定数 A , B , k を解析により求めた。解析では A , B をパラメータに式(1), (6), (7)を用いて E_n/E_0 を計算し、各試験体から得



(a) 最大応力 60%



(b) 最大応力 35%

図-12 修正モデルと実験値との比較

られた実験値と適合するように非線形最小二乗法を用いたカーブフィッティングにより A , B を算出した。解析から得られた A , B を図-10 に示す。曲線回帰の際に σ_{max}/σ_u が 40%以下のケースで計算が収束しないものが存在し、それらは図-10 から除外している。図-10 から分かるように本研究の実験から算出された A , B の間にも線形関係が見られ、式(4)に相当する実験式として次の関係が得られた。

$$A = 2.46B + 8.74 \times 10^{-2} \quad (9)$$

上記の解析結果から得られた B を用いて式(5)を k について解いた結果を図-11 に示す。図-11 の横軸は最大応力で整理しているが、同じ最大応力でもばらつきが大きく、今後もデータの蓄積が望まれる。本研究で実験した範囲では k の平均値は 4.13×10^3 となった。

本研究の解析によって算出された実験定数を用いた Wu モデル（以下、修正モデルと呼称）と実験値を比較した結果を図-12 に示す。図-12(a)から分かるように、疲労破壊を生じる最大応力の場合には修正モデルを用いることで剛性の低下を精度よく表現することができた。図-12(a)には最大応力 60%のケースを示しているが、最大

応力 40%以上の全てのケースでも同様にモデルと実験値はよく一致していた。一方で、最大応力が疲労限以下の場合には図-12(b)のように修正モデルと実験値との間に差が見られた。これは式(1)で定義される Wu らのモデルにおいては破断時の剛性 E_f を使用しており、実験において疲労限以下の最大応力を受ける場合は繰り返し数 10^7 回でも残存剛性がモデルで予測される値まで低下していないことに起因する。

疲労限以下の最大応力の場合の剛性低下について考察する。本研究では 3. (3) 節で述べたように疲労限以下の最大応力である 35%, 30% の場合は $n/N_f > 0.10$ における剛性低下はほとんど生じなかった。Brensted ら¹⁴⁾によると、GFRP の Region II での剛性低下が線形であり、その低下率は载荷応力の関数となる。すなわち、本研究で対象とした最大応力以下の場合も繰り返し数 10^7 回の段階での E_n/E_0 は最大応力 35% のケースの実験結果である 0.79 を上回ると予想される。以上のことから、本研究で対象とする GFRP に対して疲労限以下の最大応力の繰り返し荷重が作用する場合は安全率 1.27 ($=1/0.79$) を使用することで供用中に必要な剛性を確保できると思われる。

5. 結論

本研究ではハンドレイアップ成形法で作製されたロービングクロス GFRP を対象に引張疲労試験を実施し、S-N 曲線や繰り返し载荷時の剛性低下について考察した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 本研究で対象としたロービングクロス GFRP の疲労強度は S-N 曲線上で直線とみなすことができ、 10^7 回疲労限は引張強度の 35%であった。これは既往の研究で報告された GFRP の疲労限の範囲内であった。
- 2) 疲労試験中の観察から、ロービングクロス GFRP の疲労損傷は、横繊維束内に荷重方向に垂直なき裂が生じることで発生し、横繊維束内のき裂が飽和した後に層間剥離が生じて進展することがわかった。
- 3) 疲労試験中の任意の繰返し数で実施した静的载荷から GFRP の剛性低下を計測することができた。GFRP は疲労試験中のひずみ振幅が鋼と比べて大きく、剛性低下の計測にひずみゲージを使用する場合は注意が必要である。
- 4) GFRP の剛性は繰返し数の少ない時に急激に低下し、その後はほぼ線形に低下する。これらは既往の研究における Region I, II にそれぞれ対応すると思われる。Region I から II へ移行する段階での残存

剛性は載荷応力の大きさによらず同等であり、本研究で行った実験では初期剛性の約 82%であった。

- 5) 疲労損傷による剛性低下を評価するため、Wu モデルの適用性を検討した。Wu モデルで予測された値と実験値との間には差異が生じたが、モデルの実験定数を適切な値に修正することで疲労破壊が生じる場合の剛性低下を精度よく表現することができた。修正モデルでは実験定数 A と B の関係が式 (9) で表され、 B を算出するための定数 k が 4.13×10^{-3} となった。
- 6) 疲労限以下の載荷応力を受ける場合、剛性に対して適切な安全率を設けることで、供用中に必要な剛性を確保できる可能性を示した。本研究で対象とした GFRP について、疲労限以下の載荷応力を受ける場合の安全率として 1.27 を提案した。

今後の課題として、繰返し数が 10^7 回を上回る場合や変動荷重が作用する場合の疲労強度や剛性低下性状を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP 水門設計・施工指針（案），2014。
- 2) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），2011。
- 3) L. Hollaway and P. R. Head: Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure, Elsevier Science, 2001.
- 4) L. C. Bank: Application of FRP composites to bridges in the USA, Proc. of the international colloquium on application of FRP to bridges, JSCE, pp. 9-16, 2006.
- 5) T. Siwowski, D. Kaleta, M. Rajchel: Structural behaviour of an all-composite road bridge, Composite Structures, Vol. 192, pp. 555-567, 2018.
- 6) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，pp. 37-40, 1994.
- 7) 竹村兼一，藤井透：平織りカーボン布強化積層板の引張り荷重下における疲労損傷および破壊に関する研究，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 59, No. 559, pp. 714-721, 1993.
- 8) A. P. Vassilopoulos and T. Keller: Fatigue of Fiber-reinforced Composites, Springer, 2011.
- 9) F. Wu and W. Yao: A fatigue damage model of composite materials, International Journal of Fatigue, Vol. 32, pp. 134-138, 2010.
- 10) I. N. Yadav and K. B. Thapa: Fatigue damage model of woven glass-epoxy fabric composite materials, Journal of Materials Research and Technology, Vol. 9, No. 1, pp. 301-306, 2020.
- 11) P. Brensted, S. I. Andersen and H. Liholt: Fatigue Performance of Glass/Polyester Laminates and the Monitoring of Material Degradation, Mechanics of Composite Materials, Vol. 32, No. 1, 1996.
- 12) W. Hwang and K. S. Han: Fatigue of composites – Fatigue Modulus Concept and Life Prediction, Journal of Composite Materials, Vol. 20, pp. 154-165, 1996.
- 13) 日本規格協会：JIS K 7164 プラスチック—引張特性の試験方法—第 4 部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件，2005.
- 14) 日本規格協会：JIS K 7083 炭素繊維強化プラスチックの定荷重引張—引張疲れ試験方法，2008.
- 15) ASTM International: ASTM D3479/3479M – 19 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials, 2019.
- 16) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，pp. 40-42, 2017.
- 17) 増田雄市郎：ロービングクロス FRP の疲労破壊課程に関する研究，日本機械学会論文集（A 編），Vol. 47, No. 424, pp. 1266-1275, 1981.

(Received September 10, 2021)

FATIGUE STRENGTH AND STIFFNESS DEGRADATION OF WOVEN ROVING GFRP

Akihiko SATO, Yasuo KITANE, Hideki HIBI, Yoshinao GOI
and Kunitomo SUGIURA

Conducted herein is a tensile fatigue test of the woven roving GFRP and investigated the fatigue strength and the stiffness degradation due to repeated loadings was investigated. The fatigue strength were assessed based on the S-N diagram, and it was clarified that the fatigue limit was 35% of the static strength. It was also found that the stiffness decreased significantly at the initial stage of repeated loading, and then gradually decreased. Furthermore, attempt was made to reproduce the stiffness degradation of the woven roving GFRP using the existing evaluation formula. It is found that the stiffness degradation in the case of fatigue fracture can be reproduced and the constants used in the evaluation formula were proposed.