

ハンドレイアップ成形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.akihiro.45m@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

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-frp.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、ハンドレイアップ成形 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 曲線により評価でき、疲労限/静的強度比が 35%であることがわかった。また、繰り返し载荷初期に急激な剛性の低下を生じ、その後は剛性が緩やかに減少し、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 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では剛性低下モデルで使用される定数を補正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、疲労限以下の応力を受ける場合は、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, stiffness degradation, maintenance

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 年代中盤には欧州を中心に歩道橋、米国においては GFRP 桁を使用した橋長 9.1 m~11.9 m の橋が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。

しかしながら、一般に道路橋は歩道橋と比べて作用する活荷重が大きく、GFRP 道路橋の適用にあたっては疲

労に関する検討を行う必要がある。欧州や米国の事例では GFRP 道路橋は活荷重による作用応力が強度の 20%以下となるように設計されており^{6,7)}、このような変動応力に対して安全性を担保できれば良いと考えられる。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⁸⁻¹⁰⁾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¹¹⁾。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¹²⁻¹⁶⁾。例えば、Vassilopoulos ら¹²⁾により、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、その後 Region II において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と示された。この GFRP の剛性低下を表現する試みもこれまで数多く実施されており、例えば、Brondsted ら¹³⁾は4層の GFRP 積層板の引張疲労試験を実施し、载荷中に計測されたヒステリシスループから剛性低下を表現するモデルを提案した。Brondsted らのモデルは Region II の剛性低下のみを対象としており、Region II では剛性が繰り返し数に対して線形に低下し、その傾きが载荷応力の関数となることを報告している。一方で、Whitworth¹⁴⁾は $[\pm 35]_2$ の CFRP を対象に残存剛性の評価式を提案した。Whitworth のモデルは4個の実験定数を必要とするが、Region I, II の剛性低下を表現することが可能である。さらに、近年では種々の積層構成の GFRP, CFRP の疲労試験結果から Wu and Yao により剛性低下モデルが新たに提案されている¹⁵⁾。この Wu モデル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적であると考えられる。しかしながら既往の研究では強化繊維にロービングガラスクロスを用いた GFRP に対して Wu モデルの適用性を検討した例が少なく¹⁶⁾、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、既往の剛性低下モデル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 の剛性低下性状も明らかでない。

そこで、本研究では土木構造物で用いられる GFRP を対象に引張疲労試験を実施し、疲労強度特性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。なお、GFRP の成形方法にはハンドレイアップ成形法、引抜成形法、VaRTM 成形法等が存在するが、本研究では得られた知見を GFRP 道路橋の試作に応用することを念頭に、多品種少量生産に適したハンドレイアップ成形 GFRP を対象とした。

2. 実験方法

本研究では疲労損傷の広がりを透過光を用いて観察するため、試験体に $[0/90]_4$ のハンドレイアップ成形 GFRP を用いた。強化繊維としてはロービングガラスクロス（モリマーエスピー、RH 600AA 1000 INT）、マトリックス樹脂には不飽和ポリエステル（DH マテリアル、サンドーマ 2915PT-M）を用いた。ガラス繊維およびマトリックス樹脂の引張強度のカタログ値はそれぞれ 3430 MPa, 57 MPa である。GFRP の成形では、下定盤に樹脂を含浸させた強化繊維を所定の数まで手積層し、スパー

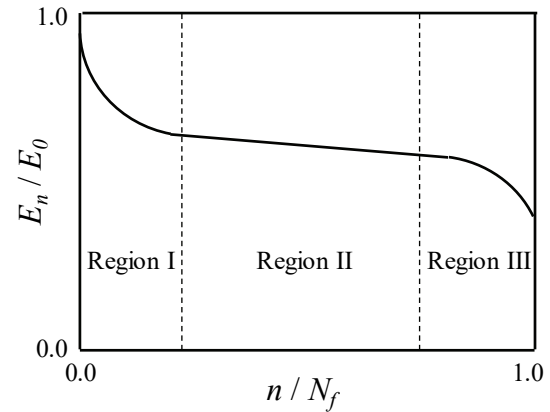


図-1 疲労による剛性低下の概念図

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 (CV: 5.39%)
Elastic modulus: E	22.31 GPa (CV: 2.37%)

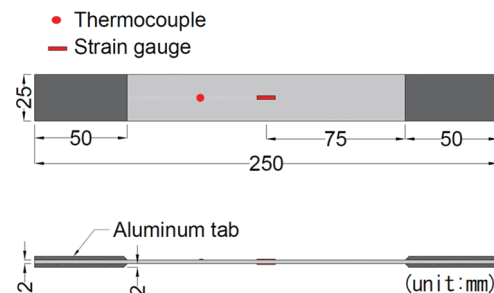


図-2 試験体上面図（上）と下面図（下）

表-2 試験体数と破断繰り返し数

$\sigma_{\max}/\sigma_u$	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	

サーを用いて厚みや繊維含有率を調整した後、上定盤と錘により常温でプレスした。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 K7164¹⁸⁾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 50

mm×25 mm×2 mm 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 7083¹⁹⁾と ASTM D3479²⁰⁾を参考に荷重制御で行った。荷重最大応力 $\sigma_{\max}$ 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、荷重周波数は 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、試験体に設置した熱電対から無負荷状態の試験体温度が平均 20.9℃、最低 13.4℃、最大 27.8℃であったことが記録されている。また、疲労試験中の試験体温度も 40℃を超えないことを確認している。

試験では破断までの繰返し数 N_f を計測するとともに、繰返し数の増加に伴う弾性係数の変化を評価した。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返し数で荷重速度 1 mm/min 以下の静的荷重を行った。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。

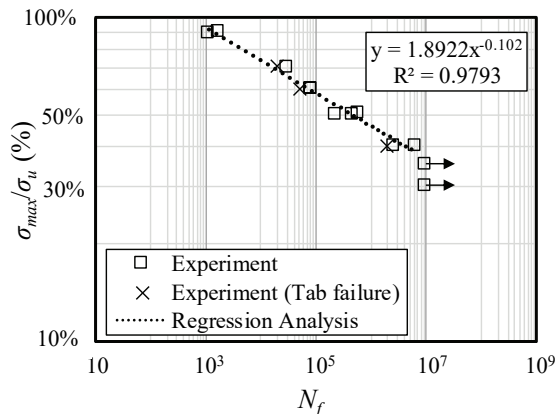


図-3 S-N 曲線

表-3 静的強度と疲労強度のばらつきの比較

	mean or model	s
Tensile strength: σ_u (MPa)	281.1	13.6
Fatigue strength: $\sigma_{\max}'$ (MPa)	$531.9 \times N_f^{-0.102}$	7.12

3. 実験結果

(1) S-N 曲線

疲労試験の結果、得られた破断繰返し数 N_f を表-2 に、S-N 曲線を図-3 に示す。図-3 の縦軸は荷重最大応力 $\sigma_{\max}$ 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。図-3 に示すように、実験した応力範囲では 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。本研究で対象とした材料の 10^7 回疲労限となる最大応力は静的強度に対して 35%であった。

疲労強度のばらつきについて考察する。ここでは S-N 曲線の近似曲線から予測される疲労強度 $\sigma_{\max}'$ と実験値 $\sigma_{\max}$ の残差から疲労強度モデルの標準偏差 s を次式により算出した。

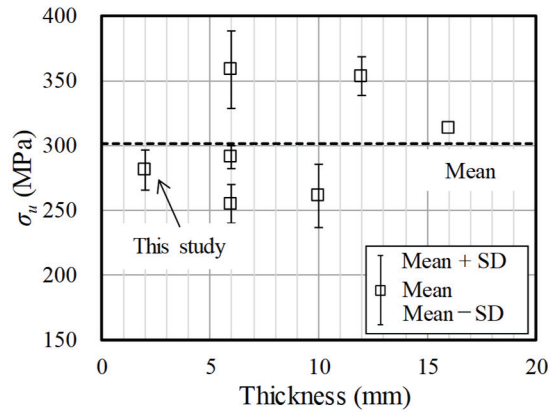
$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \times \sum (\sigma_{\max}' - \sigma_{\max})^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\max}' = 531.9 \times N_f^{-0.102} \quad (2)$$

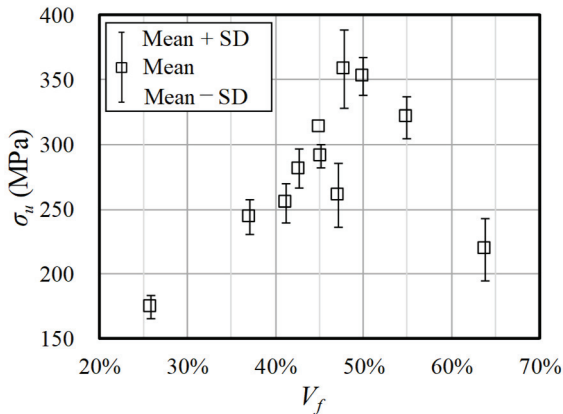
ここで、 n ：疲労破壊を生じた試験体数 ($n = 10$)、 N_f ：各試験体の破断繰返し数である。引張強度と疲労強度の標準偏差を表-3 に示す。表-3 からわかるように、引張強度の標準偏差が 13.6 MPa であるのに対して疲労強度のモデルとの標準偏差は 7.12 MPa であり、疲労強度の方がやや小さい結果となった。静的試験においてばらつきの要因となる試験体の製作誤差や成型時の微細な欠陥に加え、疲労試験では荷重周波数、応力比、試験環境の温度や湿度も疲労強度に影響を及ぼすが¹²⁾、本研究では同一の応力比、荷重周波数で疲労試験を行い、試験体数も静的試験 5 体に対して疲労試験 10 体と多かったために、引張強度に比べて標準偏差が小さくなったものと考えられる。

表-4 板厚および繊維含有率と静的強度との関係

Lamination	Hand lay-up method										
Cloth	Woven roving glass fiber										
Fiber strength (MPa)	-	-	-	3430							
Resin	Saturated polyester			Unsaturated polyester							
Thickness (mm)	6	6	6	16	6	9	12	7	10	6	2
V_f	37.1%	41.2%	25.9%	45.0%	47.8%	55.0%	49.9%	63.9%	47.1%	45.2%	42.7%
σ_u (MPa)	244	255	174	313	358	321	353	219	261	291	281
CV	5.3%	5.8%	5.1%	-	8.4%	5.0%	4.2%	11.0%	9.5%	3.1%	5.4%
Reference	(21)	(21)	(21)	(22)	(23)	(23)	(23)	(24)	(24)	(25)	This study



(a) 板厚と引張強度の関係



(b) 繊維含有率と引張強度の関係

図4 板厚および繊維含有率の影響

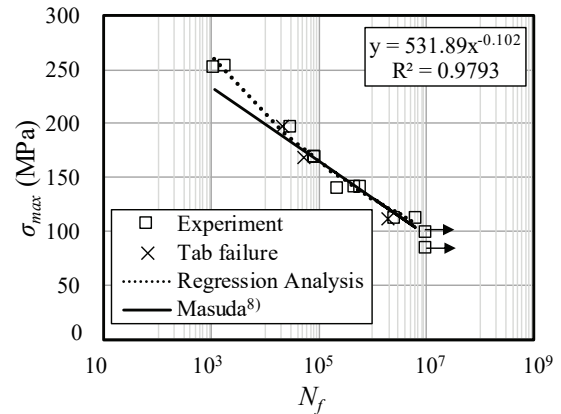
(2) 板厚が引張強度・疲労強度に与える影響

本研究で対象とした GFRP 積層板は板厚 2 mm と小さいため、既往研究との比較により板厚が引張強度や疲労強度に与える影響について考察した。まず、表4に板厚および繊維含有率と引張強度との関係を示す。ここでは本研究での結果に加えて、既往研究^{21)~25)}からロービングガラスクロスを主な強化繊維とするハンドレイアップ成形材の材料試験結果を引用した。板厚による引張強度の違いを見るために、表4 から $40\% < V_f < 50\%$ の結果を抽出し、板厚を横軸として図4(a)にプロットした。図4(a)からわかるように、本研究で使用した GFRP 積層板の引張強度は平均値より若干低く、また板厚と引張強度との間に相関関係が見られない。図4(a)では強度にばらつきがあるように見受けられるが、これは同じ板厚の間でも V_f が最大 6.6% 異なるためである。一方で、図4(b)のように横軸に繊維含有率をとってみると、 $25\% < V_f < 55\%$ の範囲で引張強度と線形関係があることが見て取れる。このことから、板厚が引張強度に与える影響は小さく、一般に言われるように繊維含有率を用いて強度を推定できることがわかる。

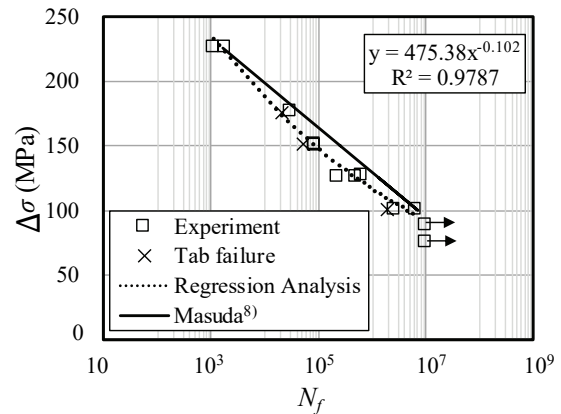
続いて、板厚が疲労強度に与える影響について調べ

表5 疲労試験条件の比較

	This study	Masuda ⁸⁾
Cloth	Woven roving glass fiber	
Resin	Unsaturated polyester	
No. of ply	4	6
Thickness (mm)	2.057	2.6 ~ 3.5
W_t	62.0%	50~60%
V_f	42.7%	—
Lamination	Hand lay-up method	
Stress ratio	0.1	0
Load freq. (Hz)	10.0	16.6



(a) 最大応力



(b) 応力範囲

図5 既往研究⁸⁾との S-N 曲線の比較

表6 GFRP 疲労限の文献値⁹⁾との比較

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

た。既往研究⁹⁾によると、GFRP の疲労強度は繊維含有率の上昇に伴い必ずしも向上するとは限らず、 V_f を過大に上昇させても強度の増加は期待できないと報告されている。強化繊維にロービングガラスクロスを用いた場合、繊維含有率の適正值は $V_f = 35\%$ であり、 $V_f < 30\%$ あるいは $V_f > 50\%$ となった時に疲労強度が大きく低下する。

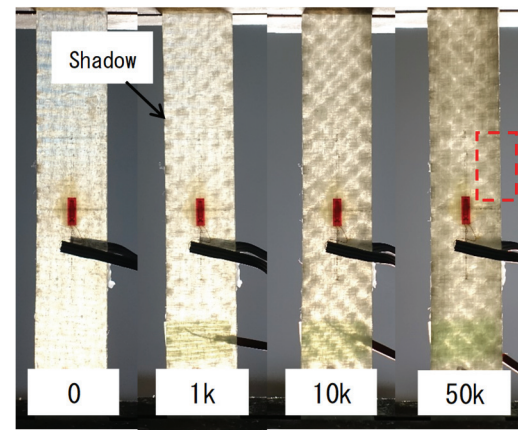
このことに留意し、増田⁸⁾によって報告されたハンドレイアップ成形 GFRP の疲労強度を本研究の結果と比較した。それぞれの試験条件を表-5に示す。いずれの疲労試験も同種の強化繊維と含浸樹脂を使用したハンドレイアップ成形材を使用しており、繊維含有率も同等であるが、増田による実験では積層数と板厚が本研究よりも大きい。本研究で得られた疲労強度の実験値と増田による実験式を片対数グラフ上に示したものが図-5である。増田は実験結果を kgf/mm-ply の単位で整理しているため、ここでは $1\text{ ply}=0.5\text{ mm}$ と仮定して MPa に換算し、疲労強度を最大応力 (図-5(a)) と応力範囲 (図-5(b)) で整理した。図-5をみると、応力比や繊維含有率等が僅かに異なるため両者に若干の差が見られるものの、本研究と増田による実験結果は概ね一致しており、薄肉積層板の範囲内では板厚の与える影響は小さいと考えられる。

また、 10^7 回疲労限となる最大応力 $\sigma_{\max}$ と応力範囲 $\Delta\sigma$ について、FRP 構造設計便覧⁹⁾に記載の文献値との比較を表-6に示す。文献では平織、朱子織、ロービングクロスを対象として出所の異なるデータを平均化してまとめており、ここでは応力比 0 での結果を記載している。表-6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。

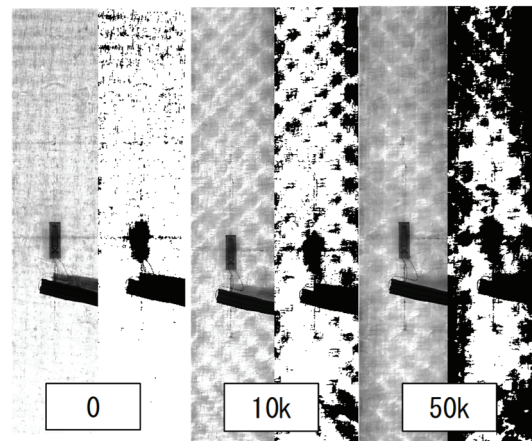
しかしながら、FRP 道路橋では主桁のフランジ厚が 14.6 mm 、積層数が 19~21 層となることもあり⁹⁾、このような板厚の引張疲労試験を実施した例は少ない。試験片寸法に着目した研究としては、谷本ら¹⁰⁾によって直径 $4\sim7\text{ mm}$ の GFRP の回転曲げ疲労試験が実施され、寸法が大きくなるにしたがってデータのばらつきが小さくなるが疲労寿命は低下すると報告されている。GFRP の疲労強度には成形過程の微細な欠陥や加工時の損傷が影響し、特に試験体寸法が小さい場合は欠陥が相対的に大きくなり、ばらつきの要因となることが知られている。そのため引張疲労強度についても一定の板厚を超えるとデータばらつきが小さくなる可能性がある。一方で、曲げ疲労強度と引張疲労強度は単純に比較することが困難であるため、今後は板厚が 15 mm を超えるような大断面構造の引張疲労試験を実施し、疲労強度に与える影響を調査する必要があるといえる。

(3) 疲労損傷の進展性

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-6に示す。図-6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。鋼構造の場合は疲労き裂の発生・進展により疲労破壊に至るが、図-6(a)から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の進展は確認されない。試験中に目視で確認さ



(a) 透過光を用いた観察



(b) グレースケール (左) と二値化画像 (右)

図-6 繰返し数に対する外観の変化 ($N_f = 54,000$)

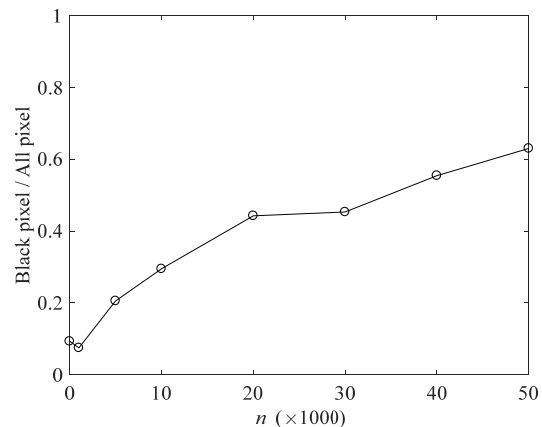


図-7 透過光の影が見られる範囲の変化

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剥離によって進展することが知られており、本研

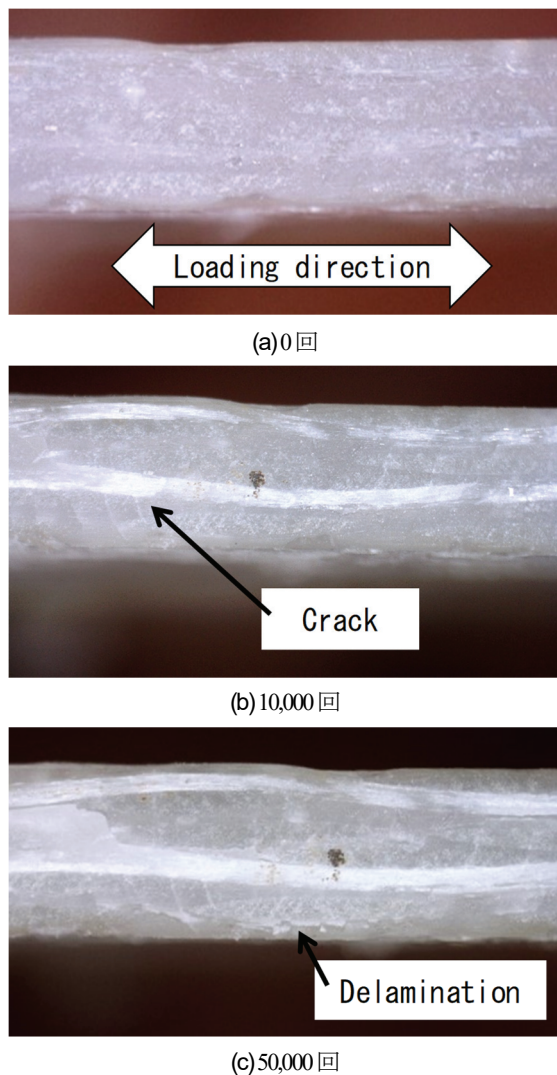
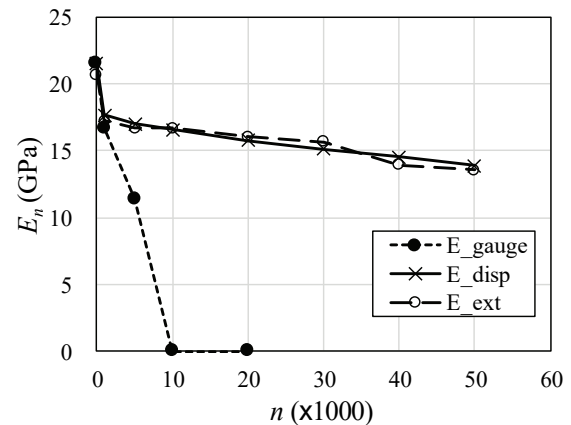


図-8 図-6(a)の赤枠部断面の拡大図

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が鋸刃状に拡大していく様子が確認された。影が見られる範囲を定量評価するために、同試験体について MATLAB Image Processing Toolbox により試験体外観を二値化し（図-6(b)）、全画素数に対する黒の画素数の比を影の範囲として算出した。影の範囲と繰返し数の関係を図-7に示す。試験体外観を二値化する際にひずみゲージやリード線なども黒色に変換されるため、図-7では繰返し数0回においても1割程度の画素が黒色となるが、その後は繰返し数の増加に伴い影の範囲が増加している。疲労破壊直前の50,000回には全体の6割程度で影が見られた。疲労破壊を生じた他の試験体でも同様の傾向が確認され、疲労破壊を生じる直前では影が見られる範囲が全体の6割～9割以上に拡大していた。疲労破壊直前の影の範囲にばらつきが生じる理由としては、疲労損傷が試験体の長手方向に拡大する前に幅方向に先行して拡大し、疲労

図-9 残存剛性の代表例 ($\sigma_{\max}/\sigma_u=60\%$, $N_f=54,000$)

損傷が飽和した断面から破壊を生じたためだと考えられる。

図-6(a)中の赤枠部断面の顕微鏡拡大写真を図-8に示す。図-8を見ると、繰返し数10,000回においてロービングガラス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剝離が発生していた。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・藤井¹¹⁾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、凝層間剝離を形成

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。

(4) 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-ひずみ線図により剛性を定義する事例も存在する¹³⁾¹⁴⁾¹⁷⁾。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²⁶⁾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検証を行う。

本研究では、静的載荷を行い初期の弾性係数を計測し

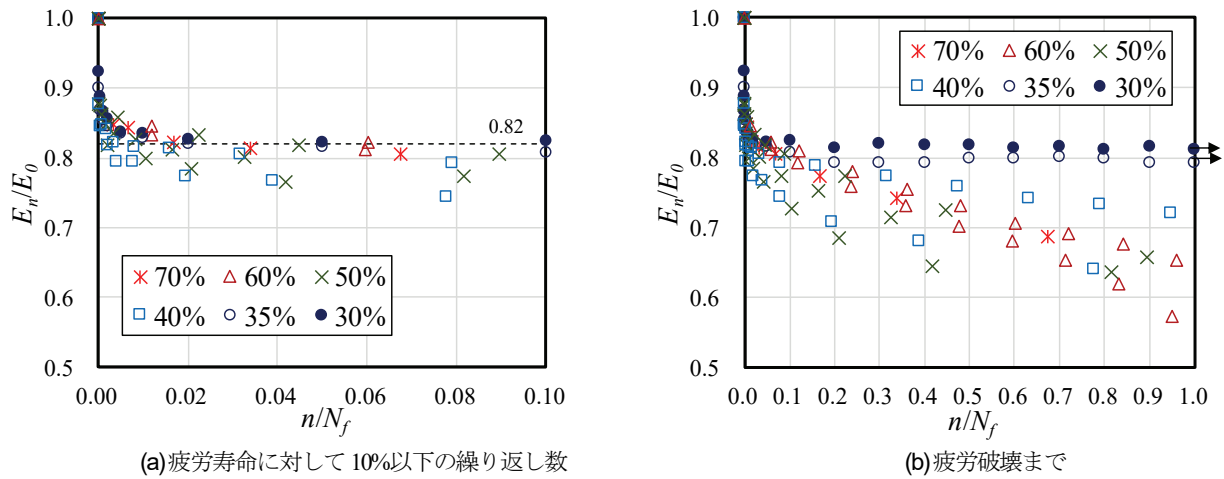


図-10 全ケースの残存剛性

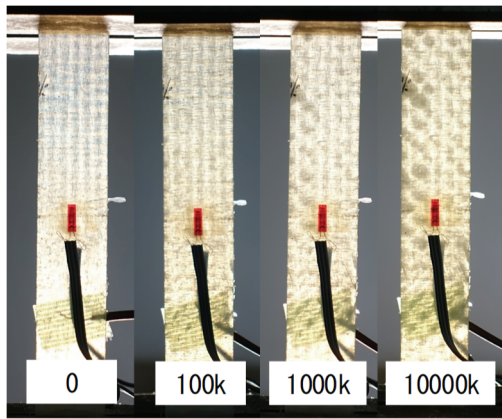
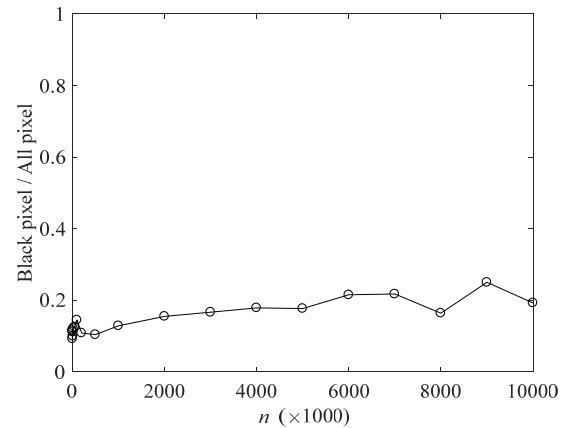

図-11 10^7 回まで疲労破壊しなかった試験体の外観


図-12 透過光の影が見られる範囲の変化

た後に疲労試験を実施し、所定の繰り返し数で疲労試験を適宜中断し静的載荷により弾性係数を計測した。疲労試験中の残存剛性の変化の一例として、図-6と同じ試験体の繰り返し数 n と剛性 E_n の関係を図-9に示す。図-9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} の算出にはアクチュエーター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-9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 $3,900 \times 10^6$ であり、ひずみゲージの接着層が急速に付着切れを迎えたためである。図-9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¹³⁾では繰り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

時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。

繰り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 との関係を図-10に示す。図-10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-10(a)から繰り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 に相当すると推察される。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・藤井¹⁴⁾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-10(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図-9の1,000回での残存剛性($E_{1000}/E_0 = 0.82$)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、本研究の試験結果から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-10(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、 $n/N_f > 0.10$ 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 10^7 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 10^6 回での値0.82, 0.81から僅かに減少した値である。図-11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、 10^7 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。また、図-12からは二値化画像における影の範囲が繰返し数 10^7 回までほとんど変化していないことがわかる。これらのことから疲労限以下の最大応力の場合には $n/N_f > 0.10$ 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¹²⁾¹⁰⁾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では部分的な繊維破断による急激な剛性低下を生じる¹⁵⁾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、任意の繰返し数で繰返し載荷を停止し、静的載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、Region IIIの急激な剛性低下を観察するためには短い間隔で静的載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継続して検討する必要がある。

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 and Yao¹⁵⁾が提唱した剛性低下モデル(以下、Wuモデルと呼称する)の適用性を検討する。Wu and Yaoは疲労損傷による剛性低下をダメージインデックス $D(n)$ を用いて表現することを試みた。モデルではダメージインデックス $D(n)$ を繰返し数 n の関数として次式で定義している。

$$D(n) = \frac{E_0 - E_n}{E_0 - E_f} = 1 - \left\{ 1 - \left(\frac{n}{N_f} \right)^B \right\}^A \quad (3)$$

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。

$$\frac{dD}{dx} = A \cdot B \cdot x^{B-1} (1 - x^B)^{A-1} \quad (4)$$

ここで、Wu and Yaoは疲労損傷の進展速度が x_1 と x_2 ($0 < x_1 < x_2 < 1$)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。

$$A = 1 + (B - 1) \frac{\log \frac{x_1}{x_2}}{\log \frac{1 - x_2^B}{1 - x_1^B}} \quad (5)$$

さらに式(5)から A と B との間に次式のような線形関係を仮定した。

$$A = p \cdot B + q \quad (6)$$

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。

$$B = k \frac{\log N_f}{(1 - R)(\sigma_{\max}/\sigma_u)} \quad (7)$$

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、繰返し数 n における残存剛性は式(3)を変形して次式となる。

$$E_n = E_0 - D(n)\{E_0 - E_f\} \quad (8)$$

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²⁷⁾はロービングガラスクロスを強化繊維に用いた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。

$$\frac{1}{E_n} = \alpha + \beta \frac{1}{\sigma_f} \quad (9)$$

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。既往の研究により GFRP の残存強度は繰り返し数の増加と共に減少することが知られており、残存強度と载荷最大応力が等しい時に疲労破壊を生じるとモデル化されることが多い²⁸⁾²⁹⁾。本研究でも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(9)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。

$$E_f = \frac{\sigma_{\max}}{\alpha \cdot \sigma_{\max} + \beta} \quad (10)$$

(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 Wu モデルとの比較の例を図-13に示す。図-13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。Wu 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¹⁵⁾。また、Yadav and Thapa¹⁶⁾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などが考えられる。

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(3)、(8)、(9)を用いて E_n/E_0 を計算し、各試験体から得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回帰分析により A 、 B を算出した。解析から得られた A 、 B を図-14に示す。曲線回帰の際に $\sigma_{\max}/\sigma_u$ 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-14から除外している。図-14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(6)に相当する実験式として次の関係が得られた。

$$A = 2.46B + 8.74 \times 10^{-2} \quad (11)$$

上記の解析結果から得られた B を用いて式(7)を k につい

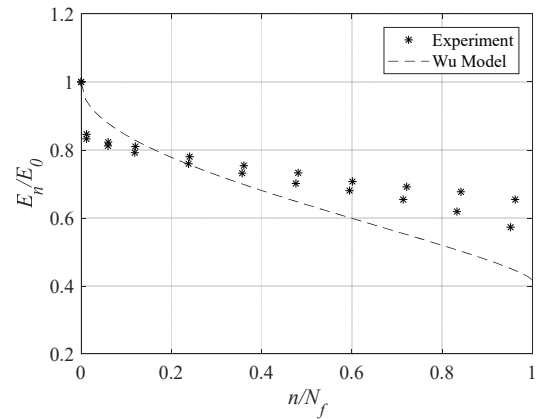


図-13 実験値とモデルとの比較 ($\sigma_{\max}/\sigma_u = 60\%$)

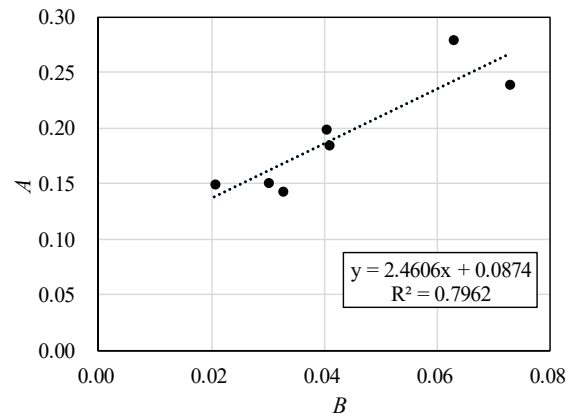


図-14 解析により得られた AB 間の関係

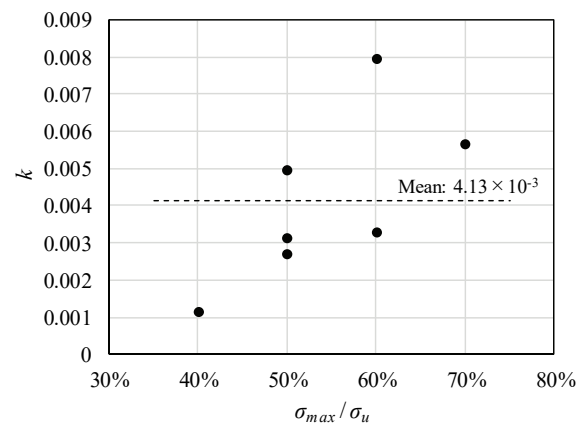


図-15 実験定数 k の計算結果

て解いた結果を図-15に示す。図-15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で再定義した Wu モデル（以下、修正 Wu モデルと呼称）と実験値を比較した結果を図-16に示す。図-16(a)~(d)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 Wu 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

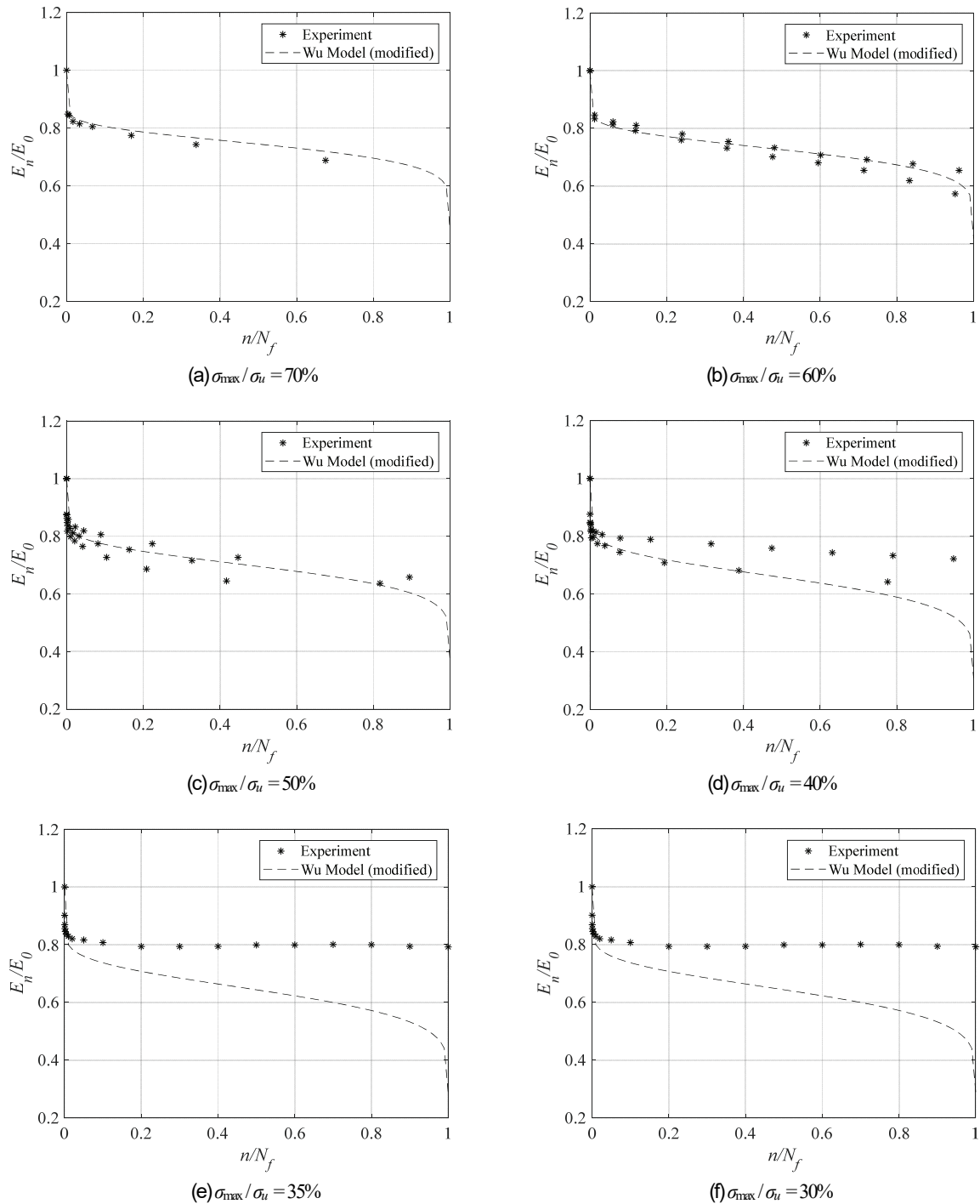


図-16 修正 Wu モデルと実験値との比較

ができた。一方で、最大応力が疲労限以下の場合は図-16(e)(f)のように修正 Wu モデルと実験値との間に差が見られた。これは式(3)で定義される Wu 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。

次に、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.(4)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。Brondsted ら¹³⁾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剛性に対して安全率 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考えられる。

5. 結論

本研究ではハンドレイアップ成形 GFRP を対象に引張疲労試験を実施し、S-N 曲線や繰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 GFRP の疲労強度は S-N 曲線の両対数グラフ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) 板厚が GFRP の静的強度に与える影響は繊維含有率に比べて小さく、異なる板厚の間でも静的強度と繊維含有率は線形関係を有する。また、本研究で用いた厚さ約 2 mm の積層板と先行研究で対象とした板厚が 3.5 mm の疲労強度は概ね一致し、この範囲で板厚による影響は小さいと考えられる。
- 3) 疲労試験中の観察から、強化繊維にロービングガラスクロスを用いた 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。
- 4) 繰返し荷重を受ける GFRP の剛性変化は繰返し数の少ない時に急激に低下し、その後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载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 Wu モデルでは実験定数 A と B の関係が式(11)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) 疲労限以下の载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引張を受ける GFRP について、疲労限以下の繰返し载荷応力を受ける場合の剛性に対する安全率として 1.27 を提案した。

今後の課題として、まず板厚が 15mm を超えるような極厚肉積層板の疲労強度について明らかにする必要がある。

また、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、そして板幅が大きい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) Hollaway, L. and Head, P. R.: *Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure*, Elsevier Science, 2001.
- 4) Bank, L. C.: 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) Siwowski, T., Kaleta, D. and Rajchel, M.: Structural behaviour of an all-composite road bridge, *Composite Structures*, Vol. 192, pp. 555-567, 2018.
- 6) Alampalli S., O'Connor, J. and Yannotti, A. P.: Fiber reinforced polymer composites for the superstructure of a short-span rural bridge, *Composite Structures*, Vol. 58, pp. 21-27, 2002.
- 7) Veltkamp, M. and Haffmans, A.: New concepts in movable lightweight bridges in fibre reinforced polymers (FRP), *Proceedings of 19th IABSE Congress 2016: Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment*, Stockholm, 21-23 September, pp. 1288-1295, 2016.
- 8) 増田雄市郎：ロービングガラスクロス FRP の累積疲労被害について，材料，Vol. 25, No. 277, pp. 48-54, 1976.
- 9) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，pp. 37-40, 1994.
- 10) 谷本敏夫，網島貞男，石川浩：各種 FRP の片持回転曲げ疲労寿命と設計安全寿命の研究，材料，Vol. 28, No. 304, pp. 40-46, 1979.
- 11) 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.
- 12) Vassilopoulos, A. P. and Keller, T.: *Fatigue of Fiber-Reinforced Composites*, Springer, 2011.
- 13) Brondsted, P., Andersen, S. I. and Liholt, H.: Fatigue performance of glass/polyester laminates and the monitoring of material degradation, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 32, No. 1, pp. 21-29, 1996.
- 14) Whitworth, H. A.: A stiffness degradation model for composite laminates under fatigue loading, *Composite Structures*, Vol. 40, No. 2, pp. 95-101, 1998.
- 15) Wu, F. and Yao, W.: A fatigue damage model of composite materials, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, pp. 134-138, 2010.
- 16) Yadav, I. N. and Thapa, K. B.: Fatigue damage model of woven glass-epoxy fabric composite materials, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 301-306, 2020.
- 17) Hwang, W. and Han, K. S.: Fatigue of composites – Fatigue Modulus Concept and Life Prediction, *Journal of Composite Materials*, Vol. 20, pp. 154-165, 1986.
- 18) 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.
- 19) 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.
 - 20) ASTM International：ASTM D3479/3479M – 19 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials, 2019.
 - 21) 藤井太一, 前川善一郎：FRPにおける強度とその変動の複合則について, 材料, Vol. 27, No. 303, pp. 1185-1190, 1978.
 - 22) 橋本国太郎, 杉浦邦征：高力ボルト摩擦接合されたGFRP部材の摩擦挙動および最大強度に関する力学的考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 58A, pp. 935-945, 2012.
 - 23) 茗荷将浩, Mohammad Abdul KADER, 北根安雄, 伊藤義人, 日比英輝：単ボルト接合実験によるハンドレイアップGFRP部材の接合部耐力評価, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 5, pp. II_62-II_73, 2017.
 - 24) 林巖, 鈴木康夫, 杉浦邦征, 西崎到, 北根安雄：土木構造用GFRP溝形材における引張特性の統計的評価, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 75, No. 3, pp. 293-304, 2019.
 - 25) 佐藤頭彦, 林巖, 北根安雄, 杉浦邦征：切込みを有するGFRP積層板への補修板接着効果と破壊性状に関する考察, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 77, No. 1, pp. 13-27, 2021.
 - 26) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説-2・鋼橋・鋼部材編, pp. 40-42, 2017.
 - 27) 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.
 - 28) Broutman, L. J. and Sahu, S.: *A New Theory to Predict Cumulative Fatigue Damage in Fiberglass Reinforced Plastics*, In: *Composite Materials: Testing and Design (Second Conference)*, ASTM STP 497, American Society for Testing and Materials, pp. 170-188, 1972.
 - 29) Kennedy, C. R., ÓBrádaigh, C. M. and Leen, S. B.: A multi-axial fatigue damage model for fibre reinforced polymer composites, *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 201-210, 2013.

(Received December 24, 2021)

(Accepted March 3, 2022)

FATIGUE STRENGTH AND STIFFNESS DEGRADATION OF HAND LAY-UP GFRP

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

Conducted herein is a tensile fatigue test of the Hand lay-up GFRP and 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 evaluate the stiffness degradation of the Hand lay-up GFRP using the existing prediction formula. It is found that the stiffness degradation in the case of fatigue fracture can be predicted and the constants used in the evaluation formula were proposed.