

ハンドレイアップ成形GFRPの疲労損傷が 構造部材の残存剛性に与える影響

佐藤 顕彦¹・北根 安雄²・杉浦 邦征³・日比 英輝⁴・五井 良直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 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

⁴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

⁵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

本研究では強化繊維にロービングクロスを用いたハンドレイアップ成形 GFRP を対象に、引張疲労損傷が構造部材の残存剛性や応力分布に与えるに影響について解析的に検討した。引張疲労損傷による材料剛性の低下を表現するモデルを有限要素解析に実装し、厚肉積層板の曲げ疲労試験を模擬した繰り返し載荷を通して、試験体内の残存剛性や応力分布の経時変化を調べた。解析の結果、試験体の応力集中部で剛性低下が先行し、載荷繰り返し数の増加に伴い剛性の低い領域が拡大する傾向が確認された。また、剛性低下が進行するとともに、その部分に発生する応力は僅かに減少するが、引張疲労による中立軸の移動は小さいことがわかった。さらには、実験結果と比較することで、部材剛性を再現するには、せん断や圧縮応力の影響を解明する必要があることが示唆された。

Key Words: GFRP, Fatigue, Maintenance, Stiffness degradation, FEM

1. はじめに

FRP は耐腐食性や軽量性に優れており、土木構造物の適用当初は補修補強材料としての適用が主であったが、2000 年の沖縄ロードパーク歩道橋¹⁾の竣工を契機として橋梁主構造部材としての適用事例が堅調に増加している。一方で海外に目を向けると、欧米では数百橋の FRP 歩道橋が存在するほか²⁾、主構造部材に FRP を採用した FRP 道路橋も存在している³⁾。これらの事例を調査したところ、全ての部材を FRP で構成したオール FRP 道路橋と⁴⁾、FRP 製の主桁と軽量コンクリート床版を合成させた複合構造の道路橋⁵⁾が存在し、前者の橋長が約 10m、後者で橋長 30 m 程度まで大スパン化している。我が国では供用中の FRP 道路橋は存在しないが、鋼・コンクリート製の橋長 30m 以下の道路橋が多数存在し、それらの維持管理が大きな課題の一つとなっているため、耐腐食性や軽

量性に優れる FRP 道路橋は既存の道路橋を更新する際の選択肢となり得ると期待される。

FRP 道路橋を構成する材料として、本研究ではハンドレイアップ成形 G (ガラス) FRP を想定している。GFRP を想定した理由としては、C (炭素繊維) FRP は GFRP と比べてイニシャルコストが極めて高く、CFRP のみで製作された土木構造物が存在しないためである。また、FRP 成型法にはハンドレイアップ成形法、引抜成形法、VaRTM 法が存在し、それぞれ FRP 道路橋での使用実績があるが⁶⁾、我が国で新たに FRP 道路橋を開発していく際には、初期設備投資の少ないハンドレイアップ成形法が適すると考え本研究の対象とした。

ハンドレイアップ成形 GFRP の材料特性や構造部材に着目した研究は数多く実施されているが⁷⁾、著者らは道路橋に適用するには疲労特性を明らかにする必要があると考え、先行研究⁸⁾においてハンドレイアップ成形

GFRP の引張 - 引張疲労試験を実施した。先行研究では引張疲労強度として S-N 曲線を示すとともに、1000 万回疲労限が静的強度の 35%であることを明らかにした。さらには、疲労試験中に実施した静的引張载荷から材料剛性を算出し、繰返し数の増加に伴い材料剛性が低下すること、既往のモデルの実験定数を修正することで疲労破壊を生じる場合の剛性低下は表現可能であること、1000 万回疲労限の場合は適切な安全率を設けることで供用中の残存剛性を担保できることを示した。

しかしながら、主桁のように曲げを受ける FRP 部材の疲労特性は材料試験片から得られた疲労特性とは異なる可能性がある。既往研究では、FRP 部材に対して曲げ疲労試験を実施し、その疲労強度や疲労損傷、残存剛性に着目している。Kitane ら⁹⁾は全長 3.66 m の FRP-コンクリート複合桁試験体に対して、設計活荷重の 2 倍に相当する 0 kN ～ 17.6 kN の荷重範囲で曲げ疲労試験を実施した。200 万回の繰返し载荷でも試験体は破壊しなかったものの、剛性は初期から 5.9%低下した。また、Meier ら¹⁰⁾は長さ 2.8 m の GFRP 箱桁部材に対して 10 kN ～ 60 kN の荷重範囲で 1 億回の繰返し曲げ载荷を実施し、その後荷重範囲を 10 kN ～ 80 kN に増加させて 4700 万回の繰返し载荷を追加した。合計で 1 億 4700 万回の繰返し载荷であったが、GFRP 部材は疲労破壊を生じず、一部に層間剥離を生じ、剛性が初期から 9%低下したのみであった。このように FRP 部材は道路橋に想定される活荷重に対して十分な疲労強度を有しているが、疲労損傷に起因する若干の剛性低下を生じるため、たわみ制限といった使用性に影響することが懸念される。しかしながら、疲労損傷後の使用性を検証する手段として現状では部材の曲げ疲労試験を実施するしかない。FRP 道路橋を新たに設計・開発する際に、試作した部材の疲労試験を実施し、結果に応じて断面形状を変更し、再び疲労試験を繰返すというのは、極めて不経済であり現実的ではない。そのため、FRP 部材の設計段階で、解析によって疲労損傷による剛性低下も考慮し、使用性を検討する方法が求められる。

そこで、本研究では材料試験片を用いた疲労試験から得られた剛性低下モデルを用いて、より大きな構造部材の残存剛性を予測することを試みた。具体的には、先行研究で得られた引張 - 引張疲労試験によるハンドレイアップ成形 GFRP の剛性低下モデルを、有限要素解析に実装することで、同材料の厚肉積層板を用いた曲げ疲労試験における、繰返し数の増加に伴う曲げ剛性の変化を予測した。さらには、著者らが実施した曲げ疲労試験¹¹⁾から得られた残存剛性と比較することで、解析の妥当性を検証し今後の課題を明らかにした。

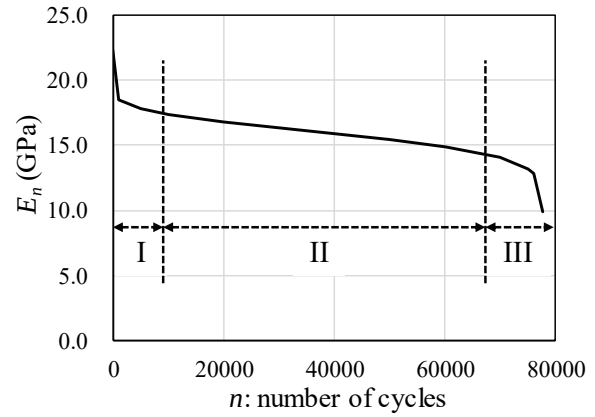


図-1 残存剛性の計算例 ($N_f=77,691$)

2. 解析概要

(1) 引張疲労試験による剛性低下モデル

引張疲労損傷による剛性低下を表現するモデルとして、本研究では Wu and Yao¹²⁾が提唱したモデルを使用する。著者らは先行研究⁸⁾において、実験値との比較によりハンドレイアップ成形 GFRP に対するモデルの適用性を検証し、モデルに使用される定数を最適化することで疲労破壊を生じる場合の剛性低下を精度良く表現できることを示した。

Wu らは疲労損傷による剛性低下をダメージインデックス $D(n)$ を用いて表現した。 $D(n)$ は次式で定義される。

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

ここで E_0 : 初期剛性, E_n : 繰返し数 n での残存剛性, E_f : N_f での残存剛性, N_f : 破断繰返し数であり, A および B は $\sigma_{\max}$, N_f , 応力比により決まる係数である。式(1)を変形することで、繰返し数 n での残存剛性は次式のように表現される。

$$E_n = E_0 - D(n)\{E_0 - E_f\} \quad (2)$$

$$E_f = \frac{\sigma_{\max}}{\alpha \cdot \sigma_{\max} + \beta} \quad (3)$$

ここで E_f : 破断時の残存剛性, $\sigma_{\max}$: 载荷最大応力であり, α および β は定数である。

またハンドレイアップ成形 GFRP の疲労寿命 N_f については、著者らの実験から得られた S-N 曲線の回帰式を用いた。

$$N_f = \left(\frac{531.9}{\sigma_{\max}} \right)^{(1/0.102)} \quad (4)$$

図-1に剛性低下モデルを示す。繰返し载荷を受ける FRP は、疲労寿命初期で急激に剛性低下を生じ (Region I), その後に剛性は緩やかに低下を続け (Region II),

疲労破壊直前に再び急激な剛性低下を生じる (Region III) ことが知られているが、図-1 から分かるように Wu らによるモデルは Region I ~ III を網羅した剛性低下の表現が可能である。また、他のモデルと比べて実験定数の数が比較的少なく、材料疲労試験からの推定が容易であるという利点がある。

(2) 剛性低下モデルの有限要素解析への実装

a) 実装手法および引張疲労による検証

ここでは前述した Wu らによる剛性低下モデルを有限要素解析に実装する手法について説明する。本研究の有限要素解析には汎用有限要素解析ソフト Abaqus 2020¹³⁾を用いた。Abaqus では材料剛性を定義するユーザーサブルーチン UMAT が提供されており、本研究では UMAT を用いて剛性低下モデルを実装した。本研究では対象とする繰り返し数を約 20 区間に分割し、各区間における剛性低下を UMAT で計算した。例えば、80,000 回の繰り返し载荷による剛性低下をシミュレーションする場合は、1 区間を繰り返し数 4,000 回に相当させ、4,000 回ごとの剛性低下を計算する。材料剛性の計算にあたっては、最初の 1 区間では式(2)で示される剛性を使用し、続く区間では次の微分形を使用した。

$$\frac{dE_n}{dn} = -\{E_0 - E_f\} \times \frac{dD(n)}{dn} \quad (5)$$

これは、最初の 1 区間は Region I に相当し、図-2 に示されるように Region I では dE_n/dn が繰り返し数に応じて急激に変化するためである。1 区間に相当する繰り返し数の影響で剛性低下性状が変化することを防ぐ目的で式(2)を使用した。その後の区間では剛性低下による応力の再分配を考慮するために dE_n/dn を使用した。

有限要素解析に実装した剛性低下モデルの妥当性検証のため、引張疲労試験片を模擬した解析を実施した。解析には図-3 に示される有限要素解析モデル (以下、FEM モデル) を使用し、材料特性として材料試験から得られた X 方向の引張弾性係数 $E_0 = 22.31$ GPa、引張強度 $\sigma_u = 281.1$ MPa を使用した。载荷条件は最大荷重が引張強度の 60% となる X 方向繰り返し载荷であり、1 区間が 4,000 回相当として解析した。解析結果を図-4 に示す。図-4 には式(2)による理論値 (Theoretical)、有限要素解析値 (FEM) のほか、3 ケースの実験値も併記した。有限要素解析値は図-3 に示される試験片中心の要素から X 方向の弾性係数を抽出した。図-4 から有限要素解析値は理論値や実験値とよく一致することがわかる。

b) 曲げ疲労解析における剛性低下モデルの仮定

以上により提案手法が引張疲労損傷による剛性低下を再現可能であることが検証されたため、同モデルを曲げ疲労試験のシミュレーションに実装する。曲げ解析にあ

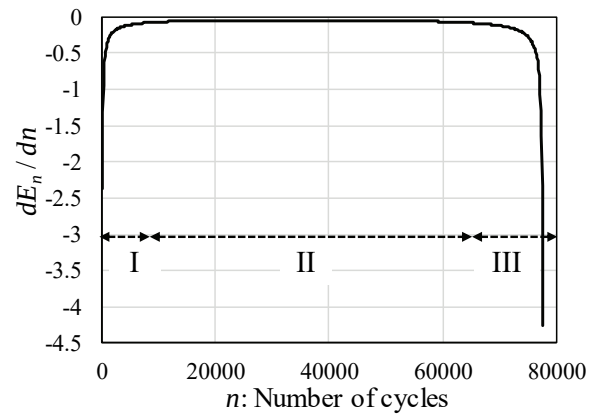


図-2 剛性の傾きの変化 ($N_f = 77,691$)

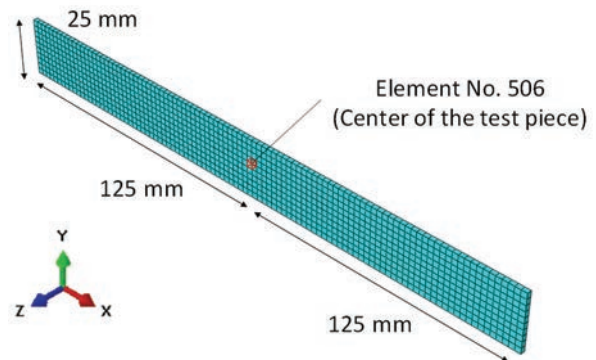


図-3 検証に使用した FEM モデル

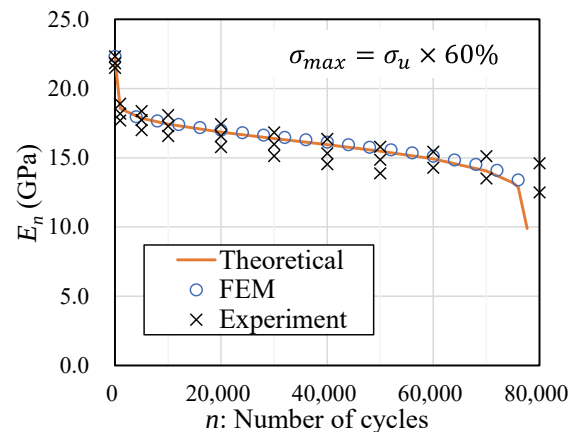


図-4 検証結果

たり、次の 3 点を仮定した。

1 点目は面外方向およびせん断による剛性低下を考慮しないことである。Wu and Yao の剛性低下モデルは面外方向およびせん断方向の応力による剛性低下を表現していないため、本研究ではそれらを考慮しなかった。なお、本研究での解析条件では面内せん断応力や面外応力が非常に小さいため、これらの影響は微小であると思われる。層間せん断応力についても本研究の剛性低下モデルでは考慮していないが、それが結果に与える影響については

3章で議論する。

2点目は圧縮応力による剛性低下を考慮しないことである。FRPの圧縮疲労試験は数多く実施されている¹⁴⁾ものの、剛性の低下については明らかになっていない。ハンドレイアップ成形 GFRP の圧縮疲労損傷と剛性低下性状の解明は今後の課題であるが、本研究では引張疲労による剛性低下を仮定しているため、圧縮の疲労損傷による剛性低下は考慮しなかった。

3点目は変動応力振幅に対する仮定である。有限要素解析では FEM モデル内で局所的な剛性低下と応力の再分配が生じ、その結果として各要素に作用する応力振幅が変化することが懸念される。しかしながら、本研究では剛性低下モデルが変動振幅応力に対応可能だと仮定し、応力変動が生じた場合も式(5)により残存剛性を推定した。そのように仮定した理由としては n/N_f の関数である E_n が異なる応力振幅でも同様の傾向を示したことが挙げられる。図-5 に引張疲労試験⁸⁾で得られた残存剛性履歴を示す。図-5 の凡例は $\sigma_{\max}/\sigma_u$ を表している。図-5 において疲労限である $\sigma_{\max}/\sigma_u = 35\%$, 30% は異なる傾向を示すものの、他の载荷ケースではほぼ同じ剛性低下性状を示していることが見て取れる。これは、応力振幅による剛性低下性状の違いを、S-N 線図の回帰曲線から得られる N_f で考慮できる可能性を示唆している。このことは変動振幅応力を用いた疲労試験で検証する必要があるが、ここでは上記を仮定して解析に使用した。なお、疲労限以下の応力振幅の場合の取り扱いについては複数の解析ケースを試行しているため、後述する解析手順にて説明する。

(3) 曲げ解析 FEM モデルおよび解析手順

曲げ解析では著者らが実施した曲げ疲労試験¹¹⁾を模擬した FEM モデルを使用した。試験体の写真を図-6 に、FEMモデルを図-7に示す。図-6に示される曲げ疲労試験では、ばねと固定端で支持される GFRP 試験体（長さ×幅×板厚 = 460 mm×200 mm×15.5 mm）に対して、起振器による上下方向の繰り返し载荷を作用させる。試験体の幅は Test region で最小 30 mm まで狭められており、ここで曲げ疲労破壊が生じるように設計されている。なお、試験時には図-7(b)の $X = 69$ mm に貼り付けられたひずみゲージにより、曲げ最大応力が曲げ強度の 30%となるよう管理した。また、ばねの位置を調整することで応力比が 0.1 となるよう調整した。

図-7の FEMモデルでは GFRP 試験体をソリッド要素でモデル化した。試験体の左端には固定端の境界条件を与え、反対側ではビーム要素でモデル化した鋼板（幅×板厚 = 200 mm×12 mm）を介してばねで支持した。試験体と鋼板の結合にはカップリングを用いた。試験体のメッシュサイズは 1 mm 四方を基本として、要素数低減の

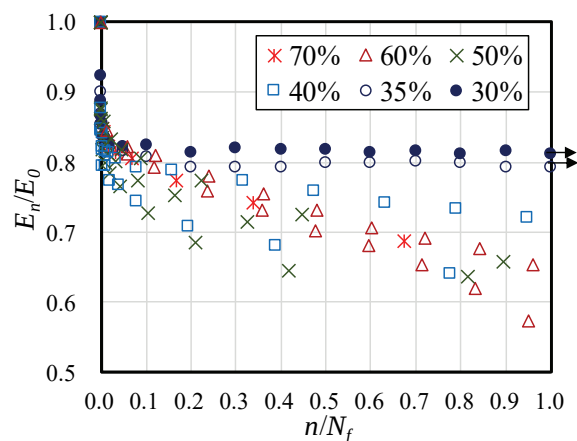


図-5 残存剛性の実験値⁸⁾

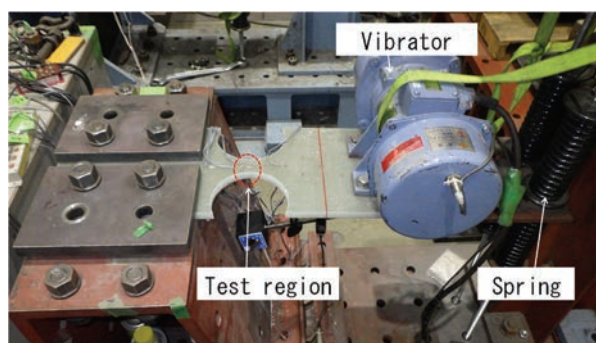


図-6 モデル化した試験体

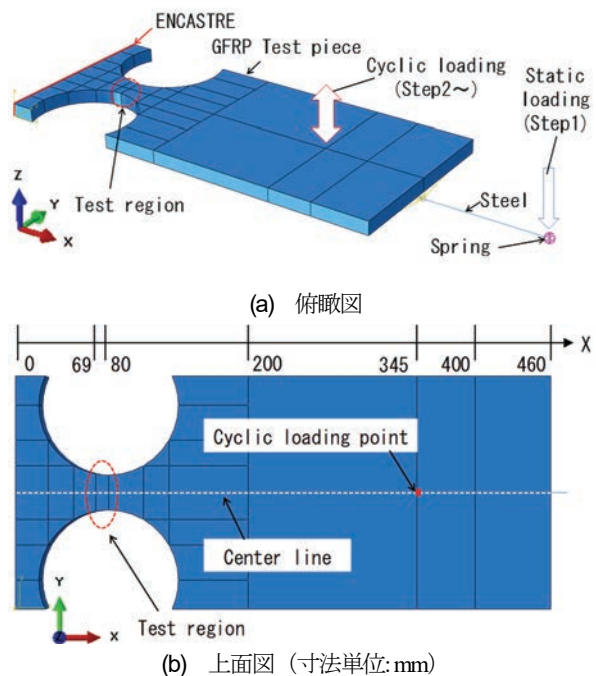


図-7 FEMモデル

ため、解析で着目しない試験体の $200 \text{ mm} \leq X$ の範囲と鋼板では 5 mm のメッシュサイズを用いた。試験体の材料特性を表-1に示す。試験体はハンドレイアップ成形法

によって作製された GFRP であり、強化繊維にはガラスロービングクロス、マトリックス樹脂には不飽和ポリエステル樹脂を用いている。本研究では GFRP を直交異方性材料として扱い、材料特性としては既往研究^{8),15)}で実施された同種の材料の材料試験から得られた値を参考にした。また、鋼板の弾性係数は 205 GPa、ポアソン比は 0.3 とした。ばね定数は 172.4 N/mm とした。

解析手順を図-8に示す。本研究では、疲労限以下の引張応力が作用する場合の剛性低下モデルの取り扱いを変化させた2種類の解析を実施したが、いずれも同じ荷重ステップを使用した。まず STEP 1 では、ばね位置に 4300 N の静的荷重を載荷した。これは Test region の応力比調整のための荷重である。その後、静的荷重を保持したまま、STEP 2以降では X=345 mm (図-7(b)) に+2000N、-2000N、除荷の順に載荷した。STEP 2以降の各ステップが 2. (2)で説明された剛性低下モデルの 1 区間に相当する。STEP 2以降の載荷には直接周期プロシーダを用い、最大反復数は 20、最大で STEP 22 まで解析を行った。

解析時における剛性低下モデルの取り扱いについて説明する。本研究で実施した2種類の解析は、以降では A 解析、B 解析と呼称する。いずれも 2. (2)で説明された剛性低下モデルを使用するが、疲労限以下の引張応力が作用した要素に対する剛性低下モデルの取り扱いが異なる。図-8(a)の A 解析では、疲労限以下の引張応力が作用する要素に対して、STEP 2 でのみ剛性低下を考慮する。STEP 3以降では剛性低下を生じない。これは、図-5にあるように疲労限以下の応力が作用する場合は Region II での剛性低下ほとんど無視できることを表現している。一方で、A 解析では、応力の再分配により新たに微小な引張応力が作用する要素に対して、剛性低下を考慮できない。そのため、図-8(b)の B 解析においては、疲労限以下の引張応力が作用する要素に対して、一律に初期剛性の 0.79 倍を与える。これは先行研究⁹⁾で報告された Region I の剛性低下量である。B 解析では応力の再分配によって新たに引張応力が作用する要素の剛性低下を考慮可能である一方で、非常に微小な引張応力でも剛性が一律に低下するため残存剛性が過小評価される懸念がある。以上の2つの解析を比較・検討した。

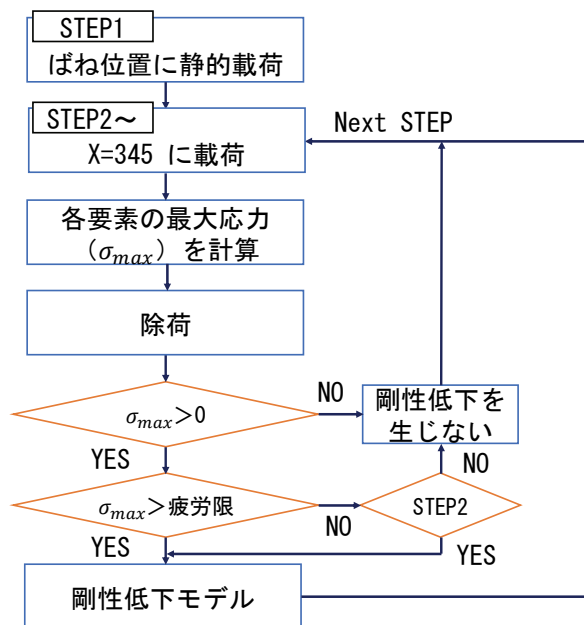
3. 解析結果および考察

(1) 応力および残存剛性の分布

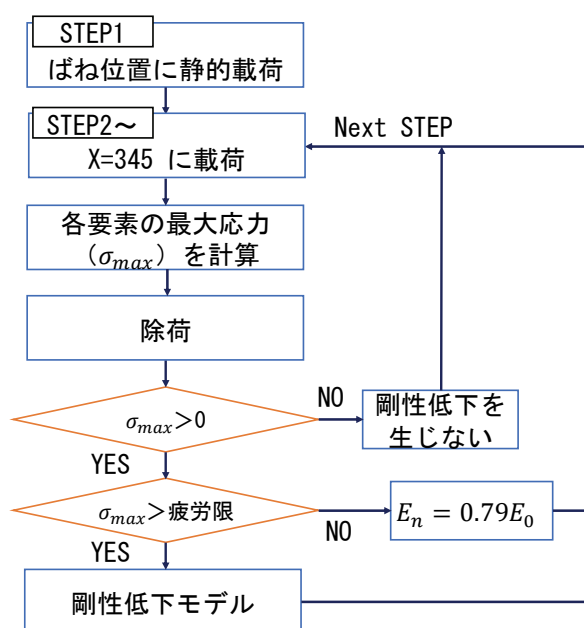
図-9に STEP 2における X 方向の最大応力分布コンター図を示す。STEP 2は繰り返し載荷前であるので、剛性分布は試験体内で均一である。図-9から試験体の Test region で 100 MPa 以上の高い引張応力が作用していることがわかる。Test region 以外の大部分では最大応力が 58

表-1 GFRP の材料特性

Direction	X	Y	Z
Elastic modulus (GPa)	22.31	22.31	6.02
Direction	XY	XZ	YZ
Shear modulus (GPa)	3.91	4.44	4.64
Poisson's ratio	0.13	0.39	0.41



(a) A 解析



(b) B 解析

図-8 解析手順

MPa 以下であり、これは剛性低下モデルで使用されている疲労限 (98.4 MPa) 以下である。

図-10に STEP 22 (繰り返し数 80,000 回相当) における、A 解析および B 解析の残存剛性コンター図を示す。図-10 (a)から A 解析において、剛性の低下は主に Test region

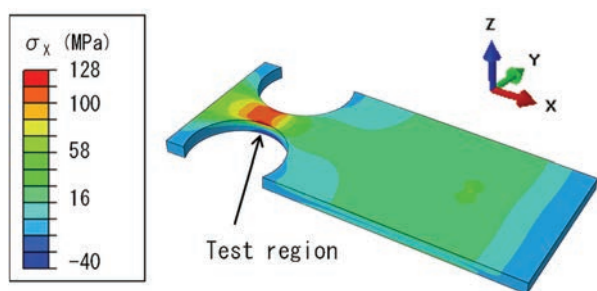
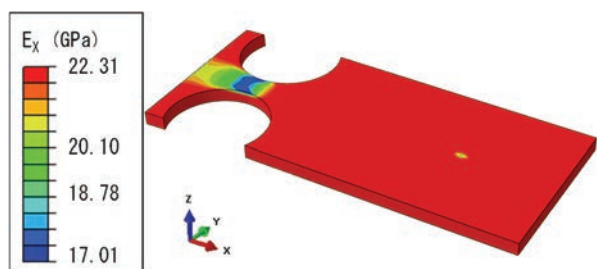
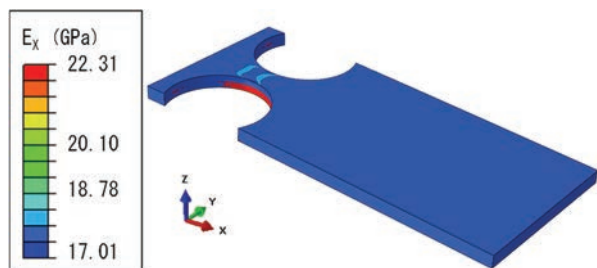


図-9 STEP2での最大応力分布



(a) A 解析

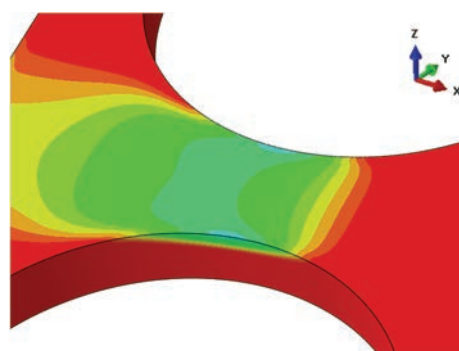


(b) B 解析

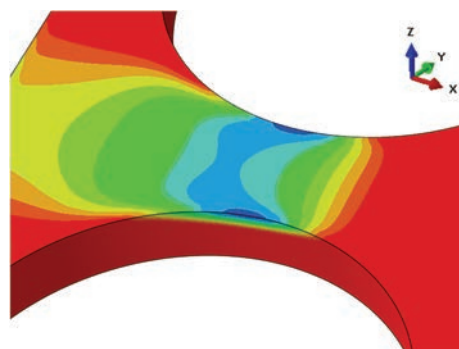
図-10 STEP22での残存剛性分布

で生じており、その他の部分では剛性は初期の 22.31 GPa からほとんど変化していないことがわかる。一方で、図-10(b)では Test region 以外でも剛性が低下している。これは、図-9 に示されるように、Test region 以外の部分では STEP2 以降の载荷により疲労限以下の引張応力が作用しているためである。いずれの解析でも剛性が最も低下したのは Test region 外縁の曲線部分（以下、Edge と呼称）であり、約 17 GPa まで低下していた。

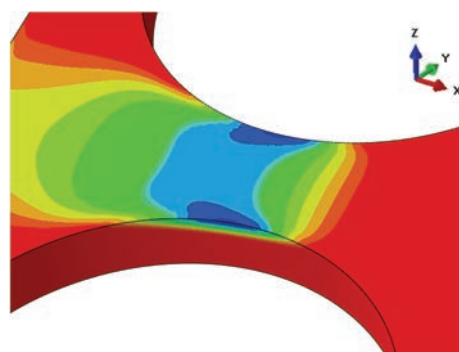
図-11 に载荷繰り返し数の増加に伴う剛性分布の変化を示す。図-11 は A 解析の結果を示しており、コンター図の色分けは図-10 と同じである。図-11 にあるように、剛性の低下は Edge で先行している。Test region の中央部（以下、Center と呼称）は作用する引張応力が Edge より小さいため、剛性の低下速度も遅い。結果としてコンター図では濃い青色で示される剛性の低い部分が Edge から Center に広がっていく傾向が見て取れる。一方で、コンター図で緑色で表される部分の面積は繰り返し数が増加してもほとんど変化していない。これらの部分は作用する引張応力が疲労限以下であるため、STEP 2 から



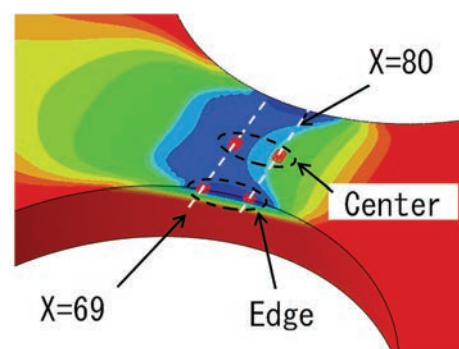
(a) STEP3 (4,000回相当)



(b) STEP10 (32,000回相当)



(c) STEP16 (56,000回相当)



(d) STEP22 (80,000回相当)

図-11 A 解析における残存剛性分布の変化

STEP3 にかけては剛性が低下したが、それ以降は剛性低下を生じなかったものと考えられる。図-12 に X=80 mm での剛性の変化を示す。図-12 の Center, Edge は図-11(d) の位置に対応しており、カッコ内は解析の種類を表している。各ステップで Center, Edge の X=80 mm に隣接す

る要素から剛性の値を計測し、各要素の平均値を図-12に示した。図-12からわかるように、Centerの剛性はA解析、B解析で異なる性状を示した。A解析では繰り返し数8,000回から剛性の低下が緩やかになり、28,000回以降は剛性が低下していない。これは、これらの要素に作用する応力が繰り返し数の増加に伴い減少し、28,000回以降は疲労限以下となったためである。一方で、B解析ではCenterの剛性は徐々に低下を続けており、作用する応力の値が変化しなかったと思われる。繰り返し数の増加に伴う応力分布の変化については次節で詳しく議論する。図-12のEdgeの剛性に着目すると、こちらはA解析とB解析で差が生じていない。X=69mmのCenter、EdgeでもA解析・B解析による残存剛性の違いは見られなかった。このことから、解析手法による剛性低下性状の違いは、作用する応力が疲労限に近い場合に顕著に生じるものと考えられる。

(2) 繰り返し数の増加に伴う応力分布・中立軸の変化

図-13にX方向の直応力分布を示す。図-13は図-7のCenterlineに沿った応力分布をプロットしており、モデル左端を0とした。凡例は解析ステップを表している。図-13からわかるように、直応力は $65\text{ mm} \leq X \leq 69\text{ mm}$ で卓越しており、これは解析ステップが進行しても変化しない。しかしながら、A解析においては、解析ステップが進行するにつれて $X \leq 100\text{ mm}$ の応力が僅かに減少している。これは、この部分の剛性が局所的に減少したために、作用する応力が減少したと考えられる。一方で、B解析においては応力分布は解析ステップ間でほとんど変化していない。これは、図-10に示されるように、B解析ではほとんど全ての部分で剛性が低下しているためである。以上のことから、構造部材の局所的な剛性低下と応力の再分配を考慮するには、A解析の方が適していることがわかった。

続いて中立軸に着目する。図-14にX=69mmでのZ方向の直ひずみ分布を示す。図-14では、より顕著に中立軸の変化が現れると予想されたB解析の結果を示している。しかしながら、図-14からわかるように、中立軸は僅かに圧縮側に移動しただけで、圧縮面のひずみ分布には変化は確認されなかった。B解析は疲労限以下の引張応力が作用する要素にも初期から21%剛性を低下させており、実現象よりも引張応力による剛性低下を過大評価している。それにもかかわらず、図-14では中立軸の変化を生じなかったため、板厚15.5mmの厚肉積層板の曲げ疲労においては、繰り返し数の増加に伴う中立軸の変化は無視できると考えられる。

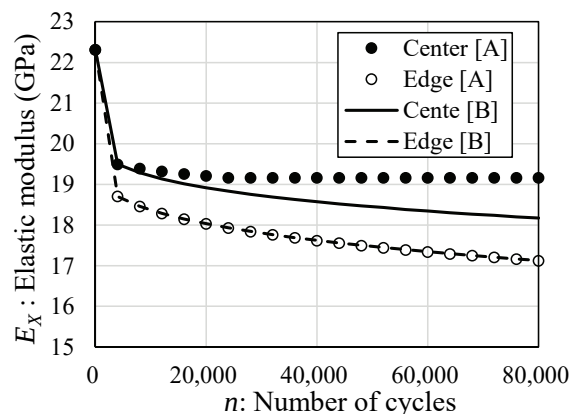
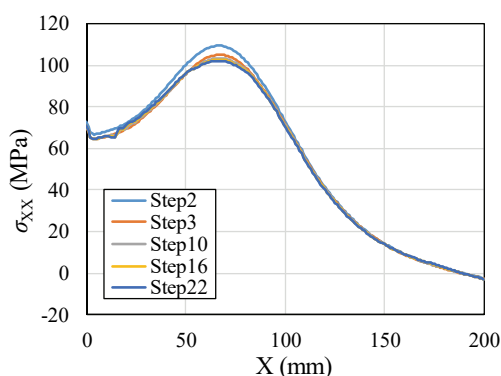
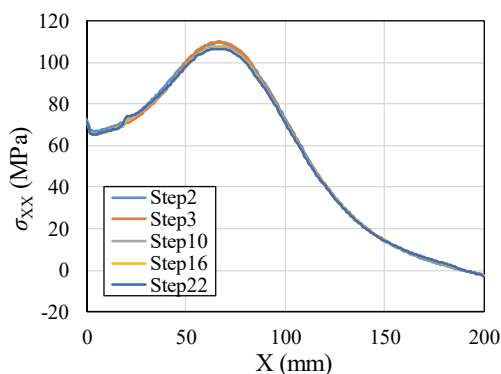


図-12 繰り返し数と剛性の関係



(a) A解析



(b) B解析

図-13 X方向の直応力分布

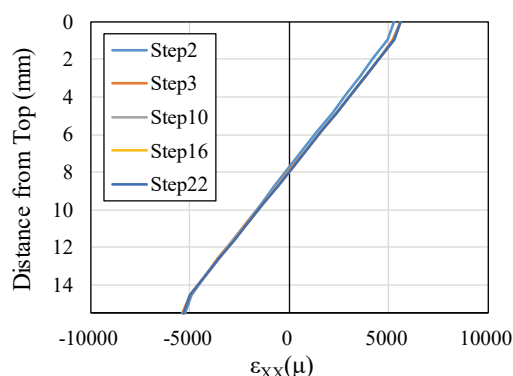


図-14 X=69mm (Edge) でのZ方向の直ひずみ分布

(3) 部材剛性の変化

ここまでは各要素の局所的な剛性に注目していたが、ここでは試験体全体の剛性（以下、部材剛性と呼ぶ）について議論する。本研究では、部材剛性を、各 STEP の最大荷重と Z 方向の最大変位の比として定義した。変位は $X=200\text{ mm}$ （図-7）の値を測定した。図-15 に繰り返し数と部材剛性との関係を示す。図-15 には 2 ケースの実験値も併記している。実験値は、疲労試験を一時中断し、 $X=200\text{ mm}$ に静的载荷を行って計測したため、その値は解析値と異なる。そのため、ここでは初期剛性からの変化率で整理した。図-15 からわかるように、A 解析・B 解析ともに実験値を上回る部材剛性を記録した。実験値は 2 ケース間のばらつきがあるものの、Region I で 15%～25%低下した。一方で、A 解析では剛性はほとんど低下せず、B 解析でも剛性低下量は 6%であった。以上のことから、今後の課題として、層間せん断や圧縮を受ける場合の剛性低下について調査する必要性が示唆された。

4. 結論

本研究では引張疲労による剛性低下を有限要素解析に実装する手法を示し、曲げ疲労試験を模擬した解析を通して残存剛性や応力の分布について検証した。A 解析では疲労限以下の引張応力による剛性低下を考慮しない一方で、B 解析では一律に 21%の剛性低下を与えることで安全側に評価した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 剛性の低下は応力集中部から進行し、繰り返し数の増加に伴い周辺領域に進展する。この傾向は解析手法によらず同じであるが、疲労限に近い応力を受ける要素では解析手法により応力分布に差が生じた。
- 2) 剛性低下による応力の再分配を考慮する目的であれば、A 解析が適しているといえる。一方で、B 解析は部材剛性の評価が A 解析と比べて安全側である。
- 3) B 解析の結果でも繰り返し数の増加に伴い中立軸は変化しない。このことから、引張応力による剛性低下だけでは厚肉積層板の曲げ疲労試験で中立軸の変化は生じなかったと考えられる。
- 4) 部材の残存剛性は A 解析・B 解析ともに実験値を上回った。このことから、引張応力以外の応力成分による剛性低下も考慮する必要がある可能性が示唆された。

今後の課題として、層間せん断や圧縮による剛性低下の有無を調査するとともに、変動振幅応力に対するモデルの適用性を明らかにする必要性が挙げられる。

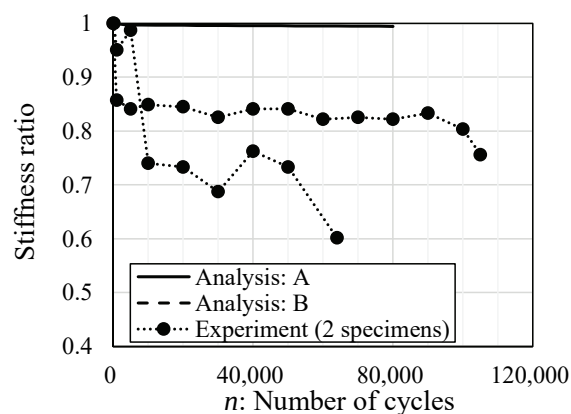


図-15 部材剛性の変化

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP22J15081 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP 歩道橋設計・施工指針（案），2014.
- 2) 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.
- 3) Hollaway, L. C.: Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure, pp. 235-247, ELSEVIER, 2001.
- 4) Siwowski, T., Kaleta, D. and Rajchel, M.: Structural Behaviour of an all-composite road bridge, *Composite Structures*, Vol. 192, pp. 555-567, 2018.
- 5) Davids, G. W., Diba, A., Dagher, J. H., Guzzi, D. and Schanck, P. A.: Development, assessment and implementation of a novel FRP composite girder bridge, *Construction and Building Materials*, Vol. 340, pp. 127818, 2022.
- 6) 林巖，鈴木康夫，杉浦邦征，西崎到，北根安雄：土木構造物用 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.
- 7) 橋本国太郎，二見悠太郎，岡井大樹，日比英輝，池田哲雄：GFRP 部材の引張および圧縮強度評価のための実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol. 68A, pp. 836-849, 2022.
- 8) 佐藤顕彦，北根安雄，日比英輝，五井良直，杉浦邦征：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，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 78, No. 5, pp. II_54-II_65, 2022.
- 9) Kitane, Y., Aref, J. A. and Lee, C. G.: Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure, *Journal of Composite for Construction*, Vol.8, Issue 2, pp.182-190, 2004.
- 10) Meier, U., Muller, R., Barbezat, M. and Terrasi, P. G.: Box Girders under Extreme Long-Time Static and Fatigue Loading, *Proc. of CICE 2010 – The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, pp. 348-351.

- 11) Sato, A., Kitane, Y., Goi, Y. and Sugiura, K.: Fatigue damage in thick GFRP laminate through the vibration based bending fatigue experiment, *Proc. of The Eighth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC 2022)*, 2022.
- 12) Wu, F. and Yao, W.: A fatigue damage model of composite materials, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32. pp. 134-138, 2010.
- 13) Dassault Systems Simulia: ABAQUS Analysis User's Manual, Version 2020.
- 14) Baunmann, A. and Hausmann, J.: Compression Fatigue Testing Setups for Composites – A Review, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 23, 2000646, 2021.
- 15) 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.

(Received August 26, 2022)

ANALYSIS OF FATIGUE STIFFNESS DEGRADATION FOR HAND LAY-UP GFRP MEMBER

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

This study analytically investigated the effects of tensile fatigue damage on the residual stiffness and stress distribution of structural members for hand lay-up molded GFRP which used woven roving as reinforcing fibers. A model that expresses the decrease in material stiffness due to tensile fatigue damage was implemented in the Finite Element Analysis, and repeated loading was performed in the analysis to simulate the bending fatigue test of thick laminates. Investigated in this analysis is the changes in residual stiffness and stress distribution in the specimen as the loading cycles increased. As a result of the analysis, it was confirmed that the stiffness decreased first in the stress concentration part of the specimen, and the low stiffness area expanded as the number of loading cycles increased. It was also found that the stress decreased slightly as the stiffness decreased, but the neutral axis may not move significantly. Furthermore, by comparing with the experimental results, it was suggested that it is necessary to clarify the effects of shear and compressive stress in order to reproduce the member stiffness.