第 I 部門　　支圧・せん断静的破壊が生じるハンドレイアップ FRP 支圧接合継手の引張疲労実験

京都大学大学院　学生員　○乾　心春
京都大学大学院　正会員　佐藤　顕彦
京都大学大学院　正会員　松本　理佐
京都大学大学院　正会員　北根　安雄

1. はじめに

FRP（Fiber Reinforced Polymers）は，その優れた重量比強度や耐腐食性から橋梁構造部材としての活用が拡大しつつある．道路橋など活荷重が大きい構造部材への適用拡大にあたり FRP の継手部分の疲労耐久性の評価が重要性を増している. FRP 構造の継手の中でも，支圧接合は接着接合に比べ剥離のリスクが小さく，かつ現場施工性に優れている．これまで，Jiang ら[1]により引抜成形 FRP における支圧接合継手の S-N 曲線や残存耐荷力の低下傾向が示されるなど，疲労挙動に関する知見が蓄積されつつある．一方，様々な成形方法の中でも，ハンドレイアップ成形は設備費が低く，断面形状の自由度が高いという利点を有するが，繰り返し荷重下における継手部分の疲労挙動に関しては十分な実験データの蓄積がなされていない．

本研究では，以上の背景を踏まえ，ハンドレイアップ FRP 部材の支圧接合継手において，疲労耐久性と破壊性状を明らかにするため，引張疲労試験を行った．加えて，既往研究の S-N 曲線と比較することで残存耐荷力の低下速度に関して検討を行った．

2. 試験概要

2.1. 試験体

本研究では，強化繊維にロービングガラスクロス，マトリックス樹脂に不飽和ポリエステル樹脂を用いた $[0/90]_{12}$ のハンドレイアップ成形 GFRP を用いた．材料試験による引張強度は 313 MPa である．試験体寸法を図 1 に示す．ダブルラップ形式の接合部とし，GFRP 母板と添接板の鋼板 2 枚をボルト接合した．ボルト径は 16 mm，孔径は 17 mm である．接合部の締め付けトルクは 10 N·m とした．母板の縁端距離 e，幅 w，ボルト径 d を用いて寸法パラメータ e/d と w/d を定義し，これらとボルト本数 n を用いて，試験体名の命名法則を J(n)-E(e/d)W(w/d)とし，本試験体は J1-E4W5 とした．

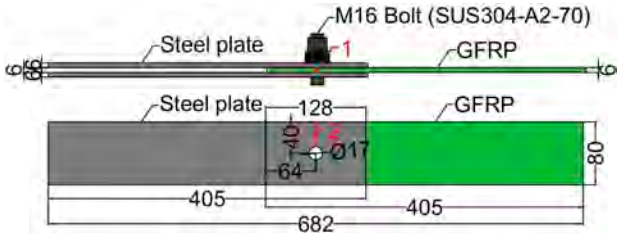


図 1　試験体寸法　（寸法単位：mm）

2.2. 試験方法

本研究では MTS 材料試験機（最大荷重 500 kN）を用いて載荷を実施した．設定最大荷重まで静的載荷を行い，その後，引張の繰り返し載荷を行った．最大荷重 P_{max} は，静的引張試験により得られた静的耐力 P_u = 51.5 kN をもとに$0.3 \leq P_{max}/P_u \leq 0.6$の範囲で設定した．試験体名は, P_{max}/P_u の値に応じて J1-E4W5-(P_{max}/P_u[%])とした．載荷速度は 5 Hz，応力比は 0.1 とした．繰り返し回数が 500 万回に達した場合, 試験を打ち切った．試験中は，荷重を測定するとともに，変位計によりボルト位置の FRP と鋼板の相対変位を計測した. 図 1 で示す点 1 が FRP, 点 2 が鋼板の計測位置である. 以降，鋼板に対する FRP の相対変位を FRP の相対変位と表記する．ボルト孔のクリアランスに伴う初期滑りの影響を解消するため，静的載荷の除荷後における FRP の相対変位を 0 と定義した．

2.3. 既往研究における支圧接合継手との比較

S-N 曲線は式(1)により表されることが既往研究より示されている．

$$P_{max}/P_u = AN_f^{-1/B} \quad (1)$$

ここで，N_f は疲労寿命，A と B は実験結果から近似することで決定されるパラメータである. Jiang ら[1]は添接板に引抜成形 GFRP を用いたダブルラップ形式の接合部において，母板を鋼板とした GFRP/Steel 試験体と，母板も GFRP とした GFRP/GFRP 試験体の引張疲労挙動を比較検討した．この試験体はボルト径 8 mm で，寸法は今回の試験体での命名法則に従うと J1-E6W6

Koharu INUI, Akihiko SATO, Risa MATSUMOTO, Yasuo KITANE
inui.koharu.87z@st.kyoto-u.ac.jp

となる．荷重を保持できなくなった時点での繰り返し回数を疲労寿命とすると，パラメータは，GFRP/Steel 試験体では $A=1.493$，$1/B=0.071$，GFRP/GFRP 試験体では $A=1.300$，$1/B=0.080$ となることを明らかにした．この研究では，P_{max}/P_u を一定回数の疲労載荷後における残存耐荷力の比率と定義しており，この 2 種類の試験体で S-N 曲線の傾きである $1/B$ が非常に近く，残存耐荷力の低下速度がほとんど同等であることを示した．

3. 試験結果

図 2 に引張荷重と破断までの繰り返し回数の関係である S-N 曲線を示す．FRP の相対変位が 1 mm，2 mm，3 mm となった回数と完全に破断した繰り返し回数を疲労寿命 N_f としてプロットしている．縦軸は P_{max}/P_u である．P_{max}/P_u=0.3 の試験体は破断せず 500 万回に達したため，打ち切りとした．図中には打ち切りの試験体を除いて累乗近似した近似曲線を示した．図中に示した式は破断時の近似曲線であり，式(1)のパラメータは A = 1.3479，$1/B$ = 0.084 である．近似曲線の決定係数は 0.959 であり，小さなばらつきで S-N 曲線を示せたといえる．本研究で対象とした 500 万回疲労限となる最大応力は静的強度に対して 30%であった．

図 3 に実測データを取得した 4 体における FRP の相対変位の推移を示す．横軸はサイクル数 n を疲労寿命 N_f で無次元化した． 図 3 より，疲労寿命で無次元化した FRP の相対変位の推移は最大荷重によらず概ね一致した. 変位は疲労寿命に対して 0%～80%で線形に増加し，80%を超えたあたりから増加率が大きくなり，破断に至っている．

図 4 に代表例として 82,638 回で破断した試験体（P_{max}/P_u=0.5, J1-E4W5-50-2）の疲労破壊性状を示す．破断した試験体には，支圧破壊，せん断破壊，引張破壊が確認された．繰り返し載荷に伴い，ボルト孔周辺では，支圧破壊の発生とともに，せん断破壊による載荷方向斜めの損傷の進展が確認できる．その結果，荷重を支持する有効断面積が徐々に減少する．疲労寿命に対して 80%を超えたあたりから変位の急増を伴いながら最終引張破壊が生じて破断に至ったと考えられる．

図 5 に Jiang ら[1]の 2 種類の J1-E6W6 の S-N 曲線と本研究で得られた J1-E4W5 の破断時の S-N 曲線を示す．J1-E6W6 と比較すると，$1/B$ の値が近くなっており，残存耐荷力の低下速度がほとんど同等であることが示唆される．

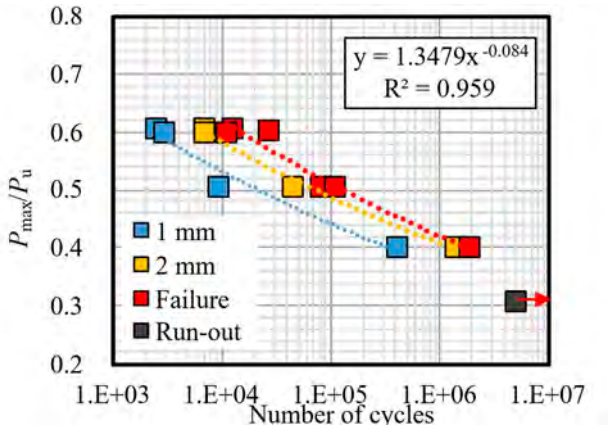


図 2　S-N 曲線

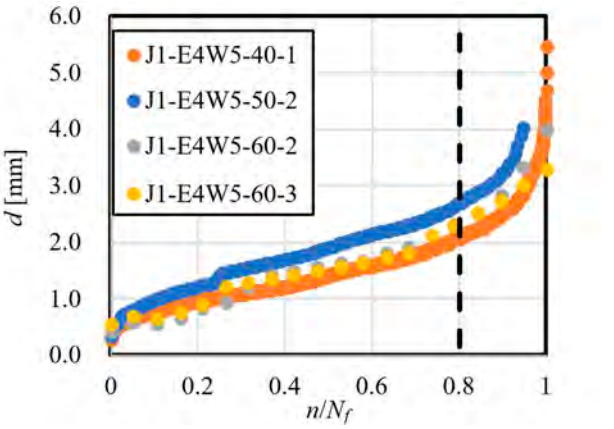


図 3　FRP 変位の推移



(a)平面図　　(b)側面図

図 4　代表的な疲労破壊性状

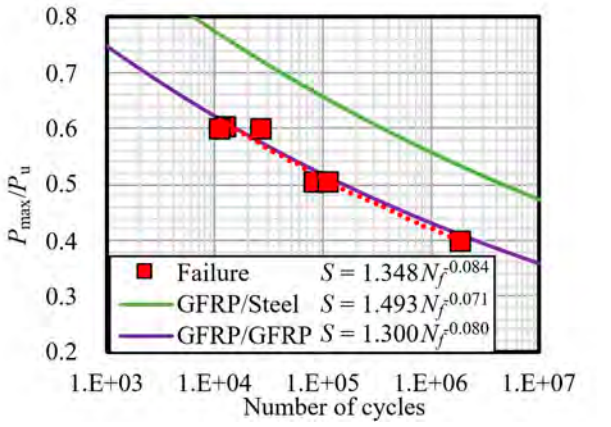


図 5　既往研究との比較

4. 参考文献

[1] Jiang et al. :　Static and fatigue behaviours of a bolted GFRP/steel double lap joint, Thin-Walled Structures, Vol.158, 2021.