

(53) CFRP引抜成形部材支圧接合部の 疲労強度評価

清水 優¹・舘石 和雄²・判治 剛³・北根 安雄⁴・廣山 佳生⁵

¹正会員 名古屋大学大学院助教 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: shimizu@civil.nagoya-u.ac.jp

²フェロー会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: tateishi@civil.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学大学院准教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: hanji@civil.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院工学研究科准教授 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

⁵学生会員 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: 999samiku@gmail.com

近年、引抜成形による CFRP 部材の製造が可能となり、実構造部材レベルの CFRP 部材を安定供給できる環境が整備されつつある。しかし、FRP 部材の接合に用いられる支圧接合については疲労特性の把握が十分でない。本研究では CFRP 引抜成形部材の有孔平板および二面せん断支圧接合継手を用いて疲労強度の評価を行った。有孔平板試験体では、公称応力範囲約 260N/mm^2 で 1000 万回載荷後も破断に至らなかったが、円孔の縁から軸方向に沿ったき裂が発生・進展した。支圧接合試験体では、公称応力範囲が約 70N/mm^2 以上のとき、ボルト孔支圧部の局所的な支圧破壊やせん断破壊が発生した。さらに有限要素解析を行いき裂が生じた円孔およびボルト孔周辺のひずみを確認した。円孔付近の最大主ひずみ範囲を用いることで CFRP 部材の形状によらず、疲労寿命を評価できる可能性を示した。

Key Words: CFRP, pultrusion, fatigue, bearing type bolted joint, maximum principle strain

1. はじめに

繊維強化プラスチック(以下、FRP: Fiber Reinforced Polymer)は、炭素繊維やガラス繊維などの繊維を樹脂で固化して成形した材料であり、軽量で比強度が高いといった利点がある。また、繊維の種類や含有量、配向方向によっては、鋼材と同程度の剛性を発揮することができる。FRP 部材はその優れた耐食性から、厳しい腐食環境下における歩道橋^{1)・3)}や、合成床版⁴⁾、検査路、水門⁵⁾などに用いられた事例がある。また、近年顕在化している鋼部材の腐食など、経年劣化した部材の補強に対しても、FRP 部材を活用した合理的な補強方法の確立が期待される。

ガラス繊維は炭素繊維に比べて安価であり、これまでの実橋への適用事例では引抜成形によって製造されたガラス繊維強化プラスチック(GFRP: Glass Fiber Reinforced Polymer)が用いられている。しかし、GFRP 部材は鋼材に

比べて弾性係数が 1 オーダー程度小さいため⁶⁾、部材の剛性が低く、変形が大きくなる。近年では炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の引抜成形技術も開発されており、大断面の CFRP 部材の効率的な製造環境が整備されつつある。CFRP 部材は鋼材の約半分程度まで剛性を確保できるため、より断面力が大きな部材に対しても適用が可能になると考えられる。

一方、FRP 部材同士あるいは FRP 部材と鋼材との接合方法はまだ確立されていない。FRP 部材の接合にはボルトやリベット等を用いた機械式接合、エポキシ樹脂等を用いた接着接合、これらを併用した併用接合が用いられる。CFRP プレートや CFRP シートによる既設構造物の補修では、施工の利便性から接着接合が用いられるが⁷⁾、構造部材として FRP を用いる場合、接着接合は接着強度のばらつきや長期耐久性が懸念されることから、接合部には機械式接合が用いられている。FRP のボルト継手ではマトリクス樹脂のクリープ変形によってボルト軸

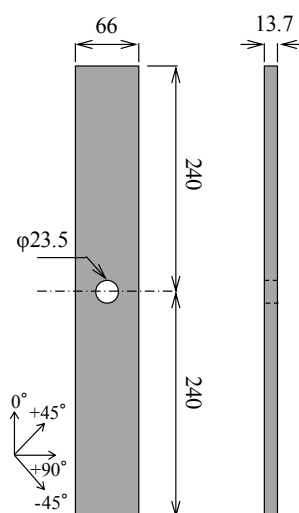
力が低減することから摩擦力の確保が難しい⁸⁾。そのため、前出の FRP 部材の適用事例^{1)・5)}や、機械・航空分野では支圧接合が用いられる。これまでに FRP 部材の支圧接合部の静的強度に関する検討が行われており、海外では各破壊形式に対する照査方法が示されている^{9)・12)}。一方、支圧継手の疲労強度については十分な検討が行われていない。また、これまでに一種類の繊維のみを用いた FRP 板の疲労強度に関する検討が行われているが、繊維の組合せや各層の繊維の配向方向によって疲労強度が異なると考えられるため、継手形状や積層構成によらずに疲労強度を評価できる手法が望まれる。本研究では、円孔を有する CFRP 引抜成形部材および、二面せん断支圧接合試験体の繰返し载荷試験を行い、疲労強度の評価を行った。また、異方性を考慮した有限要素解析を行い、き裂が生じた円孔およびボルト孔周辺のひずみから疲労強度の評価を行う。

2. 疲労試験

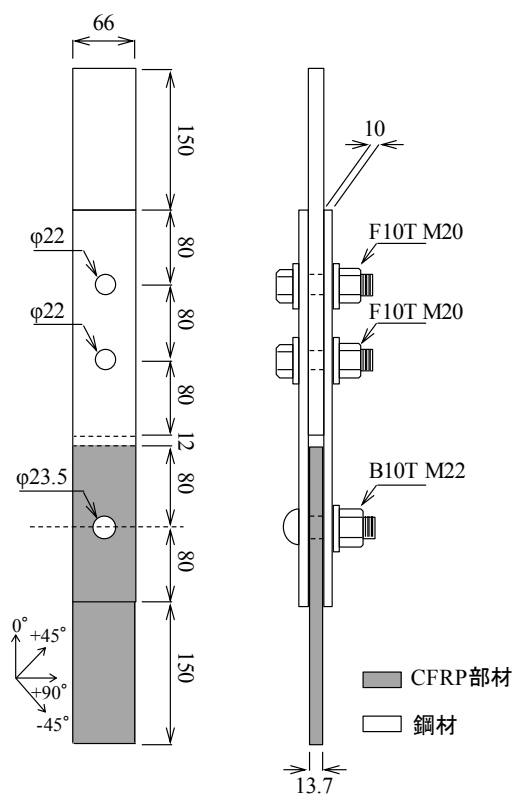
(1) 試験体

図-1 に試験体、試験ケースの一覧を表-1 に示す。試験体は有孔平板試験体と、二面せん断支圧接合試験体(以下、支圧接合試験体)の 2 種類とした。有孔平板試験体を 3 体、支圧接合試験体を 5 体とし、荷重範囲をそれぞれ変化させた。表-1 の公称応力範囲は荷重範囲を総断面積で除した値である。

支圧接合試験体では下側の母板に CFRP 部材を用いており、添接板および上側の母板は鋼材とした。鋼材同士の接合部は高力ボルト(F10T)を用いた摩擦接合になっており、試験荷重内ですべりが発生しないように設計し、トルクレンチを用いて所定のトルクを導入した。CFRP 部材と添接板の接合部は打ち込み式ボルト(B10T)を用いた支圧接合となっている。BJ-2、BJ-3 の試験体では添接板のボルト孔が若干小さく打ち込み式ボルトを完全に入力できなかったため、図-2 に示すようにボルト頭部と添接板との間に隙間が生じた。支圧接合の場合、ボルトに軸力を導入しても摩擦力の増加は期待できないが、CFRP 部材が側方から拘束されることによって静的強度が増加することが知られている¹³⁾。そこで本研究では、トルクレンチを用いて 3 N・m (手締め程度)のトルクを導入した。試験体のグリップ部分は CFRP 部材の損傷を防ぐため、板厚 2mm のアルミ板をエポキシ樹脂で接着した。また、円孔に打ち込み式ボルトを挿入することによる疲労強度への影響を検討するため、有孔平板試験体では円孔に打ち込み式ボルトを挿入した試験ケース(PB)も用いた。



(a) 有孔平板試験体



(b) 二面せん断支圧接合試験体

図-1 疲労試験体(単位:mm)

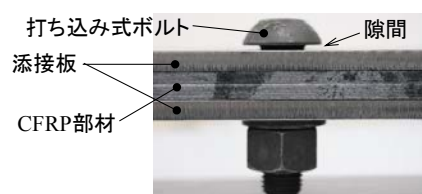


図-2 打ち込み式ボルトと添接板の隙間

表-1 試験ケース

(a) 有孔平板試験体

試験体	最小荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	荷重範囲 (kN)	公称応力範囲 (N/mm ²)	総繰返し回数 (回)	破壊形式
P-1	5.4	230.0	224.6	248	6,600,000	未破断 (円孔から軸方向に沿ったき裂発生)
P-2	5.4	240.0	234.6	259	13,000,000	未破断 (円孔から軸方向に沿ったき裂発生)
P-3	5.0	200.0	195.0	216	5,200,000	未破断 (円孔から軸方向に沿ったき裂発生)
PB*	4.9	225.0	220.1	243	10,000,000	未破断 (円孔から軸方向に沿ったき裂発生)

*円孔に打ち込み式ボルトを挿入

(b) 二面せん断支圧接合試験体

試験体	最小荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	荷重範囲 (kN)	公称応力範囲 (N/mm ²)	総繰返し回数 (回)	破壊形式
BJ-1	—	—	—	—	—	静的荷重 138.5kN 載荷時に CFRP 部材がせん断破壊
BJ-2	5.4	45.0	39.6	43.8	6,000,000	未破断 (CFRP 部材に損傷なし)
BJ-3	10.0	60.0	50.0	55.3	10,000,000	未破断 (ボルト孔支圧面の支圧破壊および円孔から軸方向に沿ったき裂発生)
BJ-4	10.0	75.0	65.0	71.9	3,226,916	せん断破壊
BJ-5	10.0	70.0	60.0	66.4	4,200,000	添接板の破断

(2) 材料特性

本研究では軸方向(0°)に炭素繊維、軸直交方向(90°), および±45°方向にガラス繊維を配向して合計 65 層積層した FRP 部材を用いた。炭素繊維層の体積比が全体の約 72%となっており、主として炭素繊維の層で外力に抵抗する積層構成となっている。使用した炭素繊維、ガラス繊維、マトリクス樹脂の材料特性値(カタログ値)を表-2に示す。

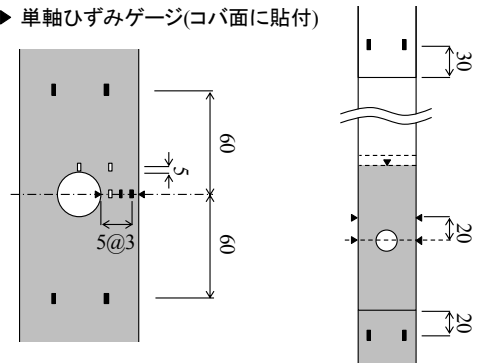
表-2 CFRP 部材に用いた材料の特性値

	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
炭素繊維	436	4,020	0.9
ガラス繊維	75	3,200	4.8
マトリクス樹脂	3.1	80	3.2

(3) 試験方法

試験体の上下端をチャックで固定し、容量 300kN の油圧試験機を用いて荷重制御で繰返し引張荷重を与えた。20～50 万回載荷するごとに、試験を中断し、き裂の確認と静的載荷によるひずみの計測を行った。ひずみゲージの貼付位置は図-3に示す通りである。総繰返し回数が 1000 万回に達するか、き裂の進展が見られなくなった場合、静的載荷によるひずみの値に変動が見られなくなった場合には損傷が進行しないと判断し、試験を終了した。

- 単軸ひずみゲージ
- 3軸ひずみゲージ
- ▶ 単軸ひずみゲージ(コバ面に貼付)



(a) 有孔平板試験体

(b) 二面せん断支圧接合試験体

図-3 ひずみゲージの貼付位置(単位:mm)

3. 試験結果

(1) 破壊形式

表-1 に各試験体の総繰返し数と破壊形式を示している。有孔平板試験体では、いずれのケースも試験体の破断には至らず試験を終了した。しかし、全ての試験体において繰返し回数が数万回程度の段階で図-4 に示すように円孔の縁から軸方向に沿ったき裂が発生、進展し、荷重範囲が小さい P-3 を除く試験体ではき裂がチャックのつかみ部まで到達していた。支圧接合の場合にはこのき裂が発生することにより支圧力を分担する断面が減少するため、疲労強度に影響を与えと考えられる。

支圧接合試験体のうち、BJ-1 は疲労試験開始前に静的荷重を 138.5kN 載荷した時点で CFRP 部材が破断した。支圧接合の場合には荷重が円孔の支圧面に集中するため、有孔平板試験体に比べて小さな荷重で破壊に至ったと考えられる。BJ-2 以降の試験体では最大荷重が 138.5kN 以下となる条件で疲労試験を行った。

BJ-2 および BJ-3 では破断に至らずに疲労試験を終了した。試験後に試験体を解体して CFRP 部材の損傷状況を確認したところ、BJ-2 では目立った損傷が見られなかったが、BJ-3 では図-5 に示すようにボルトの軸が接触する支圧面において CFRP 部材の局所的な支圧破壊が見られ、円孔縁から軸方向に沿ったき裂も発生していた。BJ-3 では繰返し数が 1000 万回に到達したため疲労試験を終了したが、疲労試験を継続した場合にはこれらの損傷が拡大した可能性がある。荷重範囲が大きい BJ-4 では、繰返し回数 320 万回程度で CFRP 部材が破断した。試験後に解体して破壊状況を確認したところ、図-6 に示すようにせん断破壊の部分と引張破壊の部分が見られた。他の試験体の結果から推察すると、せん断破壊が先行し、断面が減少した後に引張破壊が発生したと考えられる。BJ-5 では CFRP 部材が破壊に至る前に添接板に疲労き裂が発生して試験を終了した。

(2) ひずみ分布

疲労試験開始前に静的載荷を行いひずみ分布を計測した。P-1 の試験体について、最大荷重載荷時の円孔周辺のひずみを図-7(a)に示す。ひずみの計測値は試験体の表裏あるいは円孔の左右で若干異なっているが、傾向は同じである。同図より、円孔の縁に近い部分には 3000 μ 以上の大きなひずみが発生しているが、このひずみに炭素繊維やマトリクス樹脂の弾性係数を乗じて得られる応力はいずれの材料においても破断強度以下である。静的載荷を除荷した際に円孔縁に最も近い位置に添付したひずみゲージでは数十 μ ～数百 μ 程度のひずみが残留することがあり、局部的にマトリクス樹脂の非線形挙動が生じていた可能性がある。

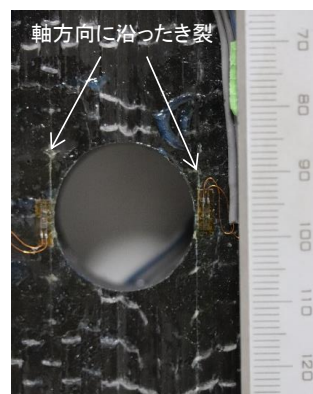


図-4 有孔平板試験体に発生したき裂



図-5 試験体 BJ-3 に発生した損傷

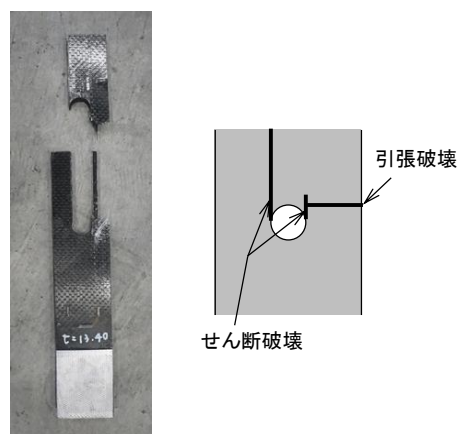


図-6 試験体 BJ-4 の破壊形式

支圧接合試験体では、添接板を設置しているため、ひずみの計測箇所が限られている。図-7(b)には BJ-4 におけるボルト設置位置の側面(コバ面)に生じたひずみをプロットしている。この図で示すように、ボルト位置のコバ面に生じる軸方向のひずみは最大で数百 μ 程度であっ

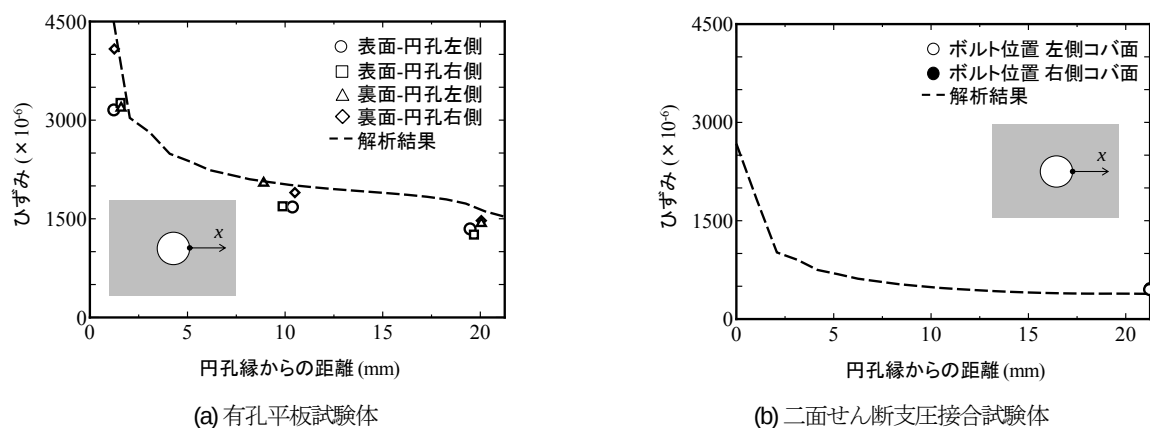


図-7 円孔周辺のひずみ分布

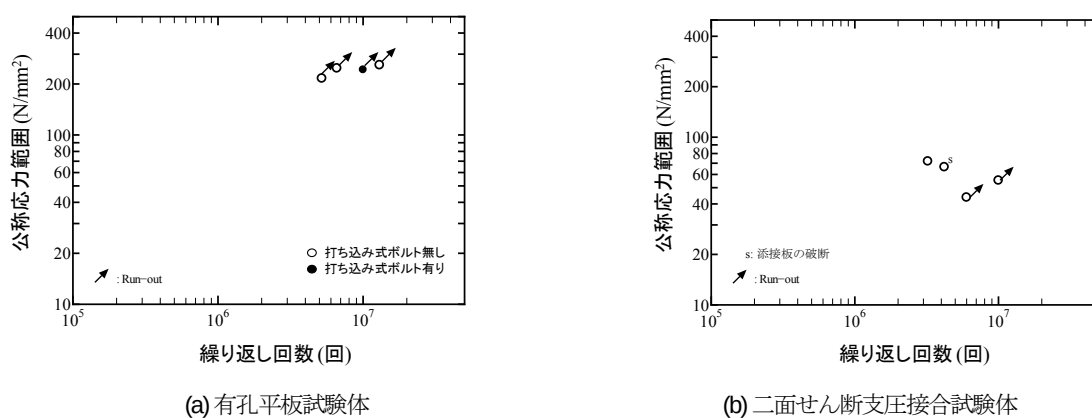


図-8 公称応力範囲による S-N 線図

た．一方，図中にはプロットしていないが，突合せ部のコバ面に生じる軸直交方向のひずみはその約 5 倍程度の値となっていた．これはボルトの支圧によって突合せ部のコバ面が膨らむように変形するためと考えられる．このように支圧接合の場合にはボルトの周辺のみでなく，突合せ部のコバ面にも大きなひずみが発生する．

(3) 疲労寿命

有孔平板試験体および支圧接合試験体についてそれぞれ S-N 線図を図-8 に示す．この図では縦軸を公称応力範囲で整理している．有孔平板試験体と支圧接合試験体ではき裂の起点となる円孔周辺でのひずみの集中が異なるため，S-N 線図は大きく異なっている．支圧接合試験体では公称応力範囲が約 60 N/mm^2 以下の領域では疲労による破断は発生しなかった．

4. 有限要素解析

(1) 解析方法

き裂や損傷が発生した円孔周辺のひずみを検討するため試験体と同寸法の解析モデルを作成し有限要素解析を行った．解析には Abaqus-6.14ver.5 を用いた．試験体では繊維とマトリクス樹脂で構成されているが，これらを別々にモデル化することは困難であるため，本解析では炭素繊維とマトリクス樹脂および，ガラス繊維とマトリクス樹脂を一体と見なした異方性材料を作成し，それらを積層することで試験体を再現した．繊維とマトリクス樹脂からなる異方性材料の材料定数の計算は文献 5) を参考に求めた．材料は全て線形弾性体とした．また，試験体では炭素繊維とガラス繊維の層が合計 65 層となっているが，計算コストを小さくするため，図-9 に示すように 16 層に簡略化してモデル化した．炭素繊維の層の体積比等は試験体と同じになっている．16 層でモデル化した場合であっても，65 層でモデル化した場合とのひずみの違いは 1% 以下であることを別途確認している．

解析モデルを図-10 に示す。有孔平板試験体の解析モデルでは、モデル下面の変位を拘束し、モデル上面に引張荷重を与えて载荷した。支圧接合試験体の解析モデルでは、CFRP 部材と打ち込み式ボルトの軸のみをモデル化した。ボルトの軸の両端の変位を拘束し、CFRP 部材の下端に引張荷重を与えた。円孔とボルトの軸との隙間は設けず、接触条件を与えて解析を行った。

(2) ひずみ分布

解析により得られた有孔平板試験体および支圧接合試験体の円孔周辺のひずみ分布を図-7 に示している。今回の解析では積層数を 16 層に簡略化して解析を行ったが、解析より得られたひずみ分布は実験結果とほぼ一致しており、この解析手法を用いてひずみ分布をよく再現できていることがわかる。

有孔平板試験体および支圧接合試験体について、最大主ひずみのコンター図を図-11 に示す。有孔平板試験体では、円孔の真横から僅かに離れた位置で最大主ひずみが最大となっている。最大主ひずみが大きい領域は、円孔の縁から軸方向の上下に広がっており、これはき裂が進展した方向と対応している。支圧接合試験体のコンター図では、ボルトと CFRP 部材の接触部直近において最大主ひずみが最も大きくなっている。最大主ひずみが大きい領域は有孔平板と同様に円孔周辺から軸方向に広がっており、BJ-3 において発生したき裂や、BJ-4 において発生したせん断破壊のき裂の発生位置と対応している。また、図の最上部である突合せ部のコバ面にも高い主ひずみが生じており、実験での計測結果と対応している。これらのことから、最大主ひずみによって CFRP 部材の疲労強度を評価できる可能性があると考えられる。

(3) 最大主ひずみによる疲労寿命の整理

各試験体に対して、公称応力範囲を作用させたときに円孔周辺に生じる最大主ひずみ範囲を解析により求めた。その結果を表-3 にまとめる。また、各試験体の疲労寿命を最大主ひずみ範囲で整理した結果を図-12 に示す。有孔平板試験体の最大主ひずみ範囲は全て 1.05%以上とであり、支圧接合試験体においても同レベルの最大主ひずみが生じる場合には円孔縁から軸方向へと進展するき裂が発生すると考えられる。支圧接合試験体において CFRP 部材に何らかの損傷が生じた BJ-3～BJ-5 は最大主ひずみ範囲が 0.94～1.22%であり、き裂が発生した有孔平板試験体の最大主ひずみ範囲とほぼ同程度となっている。試験体の中で唯一 CFRP 部材に全く損傷が見られなかった BJ-2 は他の試験体に比べて最大主ひずみ範囲が小さく、図-12 では最も下方にプロットされている。これらのことから、最大主ひずみ範囲の大小関係は CFRP 部材の損傷の有無と対応していることが確認できる。疲

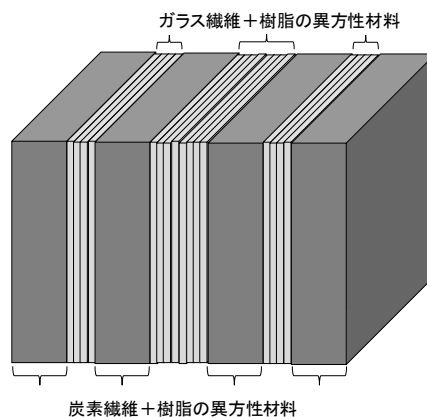


図-9 解析に用いた CFRP 部材の積層構成

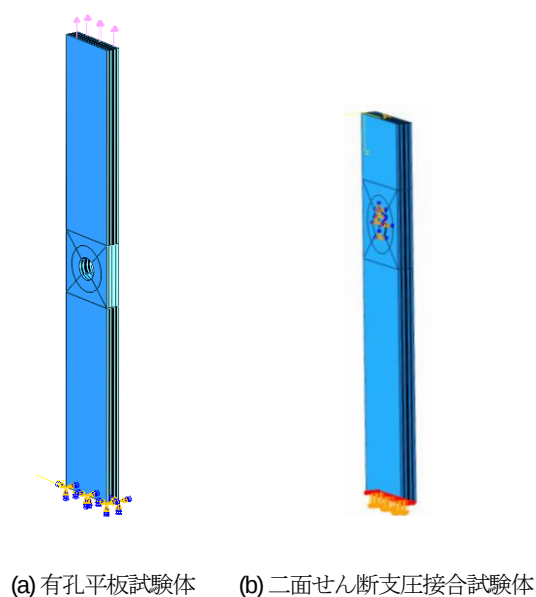


図-10 解析モデル

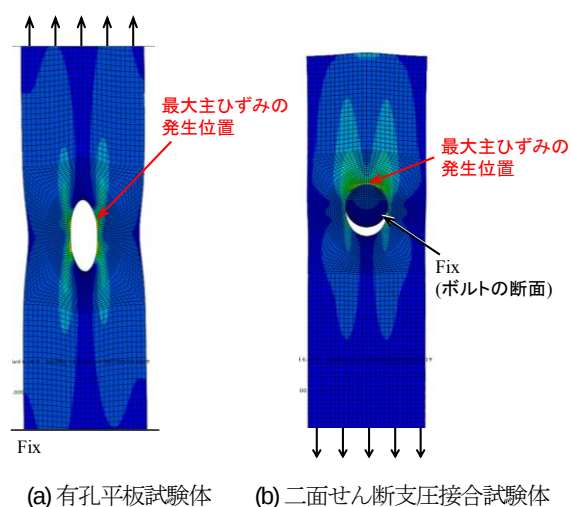


図-11 最大主ひずみのコンター図

表-3 各試験体の最大主ひずみの値

(a) 有孔平板試験体

試験体	公称応力範囲 (N/mm ²)	最大主ひずみ範囲 (%)
P-1	248	1.20
P-2	259	1.25
P-3	216	1.05
PB*	243	1.18

(b) 二面せん断支圧接合試験体

試験体	公称応力範囲 (N/mm ²)	最大主ひずみ範囲 (%)
BJ-2	43.8	0.75
BJ-3	55.3	0.94
BJ-4	71.9	1.22
BJ-5	66.4	1.13

労試験のデータ数が十分ではないが、最大主ひずみ範囲を用いることで、形状や積層構成等によらず CFRP 部材の疲労寿命を評価できる可能性がある。

5. まとめ

本研究では、CFRP 引抜成形部材の有孔平板および二面せん断支圧接合継手の繰返し引張疲労試験を実施し、その疲労特性について検討した。また、異方性を考慮した有限要素解析により円孔周辺に発生するひずみ等について検討を行った。得られた結果を以下に記す。

- (1) 有孔平板の疲労試験では、全ての試験体で試験体の破断は生じなかったが、円孔の縁から軸方向すなわち炭素繊維に沿う方向にき裂が進展した。
- (2) 二面せん断支圧接合継手では、有孔平板よりも小さな静的荷重で CFRP 部材が破断した。これは、ボルトから受ける支圧が CFRP 部材の円孔に集中するためと考えられる。
- (3) 二面せん断支圧接合継手の疲労試験では、円孔の前面における部分的な支圧破壊や円孔縁から軸方向へと進展するき裂が見られた。
- (4) 異方性を考慮した有限要素解析により、円孔周辺のひずみを確認したところ最大主ひずみが大きくなる領域はき裂が疲労試験においてき裂が発生した領域と対応していた。
- (5) 円孔周辺に生じる最大主ひずみを用いることで、円孔縁から発生する疲労き裂を評価できる可能性がある。

参考文献

- 1) 北山暢彦, 佐伯彰一, 山城和男: 沖縄ロードパーク

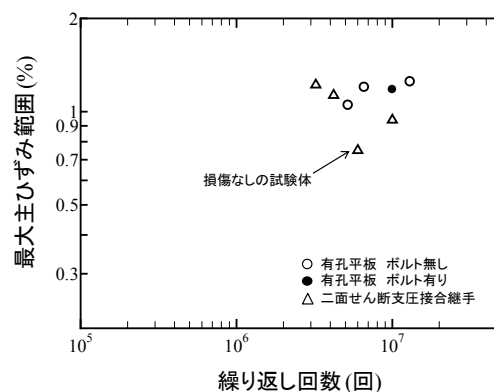


図-12 最大主ひずみ範囲を用いた S-N 線図

歩道橋の設計, 第 1 回 FRP 橋梁に関するシンポジウム, pp.103-106, 2001.

- 2) 野原正行, 熊田哲規, 宮本成明, 川上盛樹: FRP トラス歩道橋の設計・施行例, 第 3 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, pp.187-194, 2009.
- 3) 高橋秀夫, 渡辺忠朋, 中村一史, 松本幸大, 西崎到, 日比英輝: FRP 下路トラス橋梁の設計施工, 第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, pp.41_1-41_8, 2013.
- 4) 久保圭吾, 小松原昭則, 山口真一, 若山誠, 興地正浩, 石崎茂: 長支間 FRP 合成床版の設計と施工, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.277-282, 2003.
- 5) 土木学会複合構造委員会: FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 丸善, 2013.
- 6) 小林憲治, 日野伸一, 山口浩平, 貝沼重信: GFRP 引抜き成形材の材料特性およびはり部材の曲げ挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.1, pp.1-12, 2011.
- 7) 土木学会複合構造委員会: FRP 接着による鋼構造物の補修・補強技術の最先端, 丸善, 2012.
- 8) 木嶋健, 勝野壽男, 小林憲治, 日野伸一, 西崎到: FRP ボルト接合における軸力の経時変化に関する実験的検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, CS10-004, pp.449-450, 2006.
- 9) Clarke, J. L.: Structural design of polymer composites, Eurocomp design code and handbook, E & FN Spon, 1996.
- 10) National Research Council: Guide for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements, CNR-DT 205, 2007.
- 11) ASCE: Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Structures, 2010.
- 12) Bank, L. C.: Composites for construction, Chapter 15, pp.484-526, John Wiley & Sons, 2006.
- 13) 上山裕太, 北根安雄, 松井孝洋, 近藤富士夫, 館石和雄: ハイブリッド FRP 積層体の支圧強度評価法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.5, II_74-II_83, 2017.

(Received August 30, 2019)

FATIGUE STRENGTH EVALUATION ON BEARING TYPE BOLTED JOINT OF PULTRUDED CFRP MEMBER

Masaru SHIMIZU, Kazuo TATEISHI, Takeshi HANJII and Yasuo KITANE

In recent years, the pultrusion method for manufacturing CFRP member has been established. The environment to stably supply large-scaled CFRP members is being developed. On the other hand, mechanical behavior and fatigue behavior of the bearing type bolted joint used for connection of FRP members is not clearly understood. In this study, tensile fatigue tests on perforated plate and double shear bearing type bolted joint of pultruded CFRP were performed. The perforated plate specimen represents superior fatigue durability over 10million cycle even under nominal stress range of 260 N/mm^2 . However, the fatigue crack occurs from the edge of the hole, and propagates to longitudinal direction. As for bearing type bolted joint specimen, local bearing failure was observed around the contact part between bolt and CFRP member. The shear-out failure was also observed when the nominal stress is over 70 N/mm^2 . Moreover, finite element analysis was performed to examine the stress around the bolt hole. Fatigue durability of pultruded CFRP member was discussed by arranging fatigue test results with maximum principal strain obtained from the analysis.