

一部繊維化したFRP材の強度評価と その定着・接合法に関する基礎検討

松本 幸大¹・松井 健良²・田口 孝³・小宮 巖⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学大学院准教授 建築・都市システム学系
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: matsumoto.yukihiko@tut.jp

²豊橋技術科学大学大学院生 建築・都市システム学専攻
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)

E-mail: matsui.takayoshi.us@tut.jp

³矢作建設工業(株) エンジニアリングセンター主席研究員
(〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74)

E-mail: t-taguchi@yahagi.co.jp

⁴正会員 福井ファイバーテック(株) 研究開発グループ
(〒441-3106 愛知県豊橋市中原町岩西 5 番地の 1)

E-mail: i-komiya@fukui-fibertech.co.jp

鋼構造物において多用されているターンバックルブレースは、設計上、圧縮側耐力は無視されるが、圧縮変形時に座屈し、周辺の仕上げ材に損傷を与えたり、座屈に伴う端部等の局所的な塑性化や繰返し変形により破断したりする可能性がある。こうした課題に対して、筆者らは、軽量・高強度な CFRP 材に着目し、その一部を繊維化することで圧縮力が作用しないブレース部材の研究開発を行っている。本報告では、一部繊維化した CFRP 材の材料強度、その両端にパイプ式ターンバックル胴を用いて定着を行った場合の定着強度、さらに繰返し载荷を受けた場合の耐久性を実験的に検証し、本研究で提案する複合材料ブレースの応用可能性について纏める。

Key Words: brace, pultrusion, partially fiber, connection, CFRP rod

1. はじめに

鋼構造物において多用されている鋼製ターンバックル(以下、TB と記す)ブレースは、設計上、圧縮側耐力は無視されるが、圧縮変形時には早期に座屈し、面外への大きな変形が生じることから、周辺の仕上げ材に損傷を与えたり、座屈に伴う端部等の局所的な塑性化が発生し、繰返し変形により破断したりする可能性がある。こうした課題に対して、圧縮変形が生じても部材に圧縮力が作用しない接合金具を用いたブレース機構¹⁾、部材を構成する材料自体の圧縮抵抗力を無くすよう紐状の材料を用いたブレース²⁾などが提案・応用されている。筆者らは、ブレース部材に軽量・高強度な CFRP 材、また定着に関して既存の TB 胴を応用して用いることに着目し、圧縮力が作用せず接合も容易なブレース構造への応用に関する研究開発を行っている³⁻⁵⁾。これは、CFRP 棒材の

一部を、成形段階で樹脂含浸を行わずに一部繊維化した CFRP 材 (Partially Fibered CFRP 材、以下 PFCFRP 材と記す)を用い、図-1 に示すように繊維化された部分で圧縮変形時の変形を吸収することで、ブレースには引張力のみが作用し、座屈変形も生じないブレースである。PFCFRP 材の成形には、生産性と機械的性質の安定性を考慮して引抜成形を採用し、図-2 のように樹脂含浸工程を定期的に行わないことで実現する。また、CFRP 材の定着・接合法としては、鋼管に樹脂を充填する方法⁶⁾、スリーブを用いた定着方法⁷⁾、鋼管に膨張セメントを充填する手法⁸⁾などが既往の技術として示されている。しかしながら、これらは専用の定着具を用いており、特に既存の鋼構造物への接合は容易ではないと考えられる。そこで本研究では、パイプ式 TB 胴⁹⁾を用いることで、その両端に加工されているネジ部のうち、定着側と逆側のネジを用いて接合が極めて容易となり、既存鋼製 TB

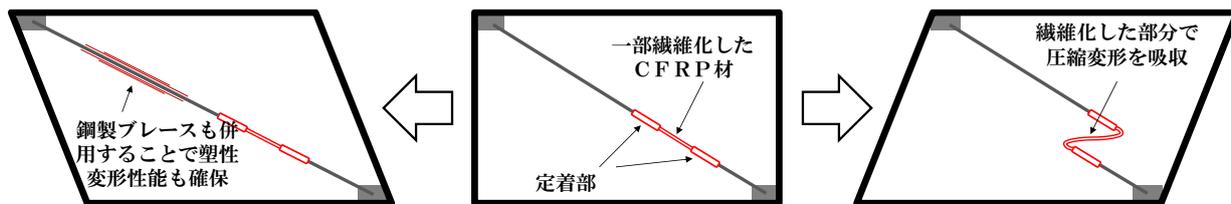


図-1 PFCFRPブレースの概要

ブレースからの交換も可能となる手法を提案している。

本論では、以上のような、座屈を生じず軽量で接合も容易な PFCFRP ブレースについて、外径 12mm の CFRP 材を対象として、図-3 に示す 2 種類の試験セットアップ条件を設定し、ブレース材の耐力評価、定着耐力評価を行った結果について報告する。図-3 (a) は実際のブレース材としての外力条件に近い状態を模擬した方法であり、主に定着耐力試験で採用している。また、図-3 (b) は定着部での破壊を防止するための方法であり、CFRP や PFCFRP の材料試験に採用している。

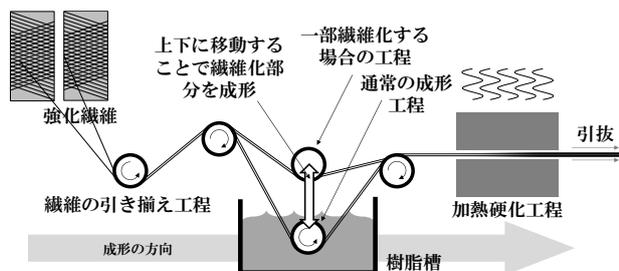
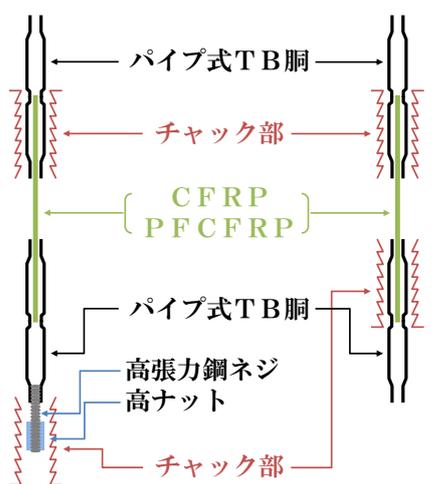


図-2 PFCFRP の成形法



(a) A法 (b) B法

図-3 試験セットアップ条件

2. 材料強度評価

(1) 試験方法

CFRP の一部を繊維化することは、成形時の繊維の緊張度合いのバラつきや繊維が露出していることによる微細な損傷などにより強度低下が生じる恐れがあることから、CFRP および PFCFRP について材料試験を実施した。表-1 に CFRP の概要を示す。試験体には、図-4、表-2 に示すように CFRP および PFCFRP の両端部に楔（オーエッチ工業 D-7.5）を打ち込み、CFRP の材料試験では M30 パイプ式 TB 胴 ($L_0=400\text{mm}$, フルサト工業 (径の異なるものについても同様)) に埋め込み長さ $L=300\text{mm}$, PFCFRP の材料試験では M20 パイプ式 TB 胴 ($L_0=300\text{mm}$) に埋め込み長さ $L=220\text{mm}$ として挿入し、鉄球 (IKK ショット TSH-120) とエポキシ樹脂 (コニシ E2300W) により定着し、図-3 (b) の B 法で実施した。载荷は準静的引張試験とし、CFRP を 5 体、PFCFRP を 10 体実施した。試験体の様子を図-5 に示す。

表-1 CFRP の概要

炭素繊維種類	Zoltek PX35
炭素繊維弾性率 E_f^{10} [GPa]	242
炭素繊維強度 T_f^{10} [GPa]	4.137
マトリックス樹脂	ビニルエステル樹脂
繊維体積含有率 V_f [%]	60.5
外径 [mm]	12

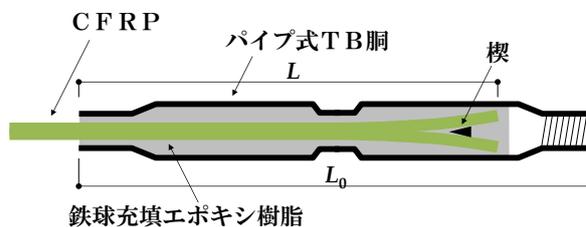


図-4 CFRP/PFCFRP 定着端部の状況

表-2 材料試験体定着部の寸法

	CFRP(M30)	PFCFRP(M20)
TB 胴長さ L_0 [mm]	400	300
CFRP 定着長さ L [mm]	300	220

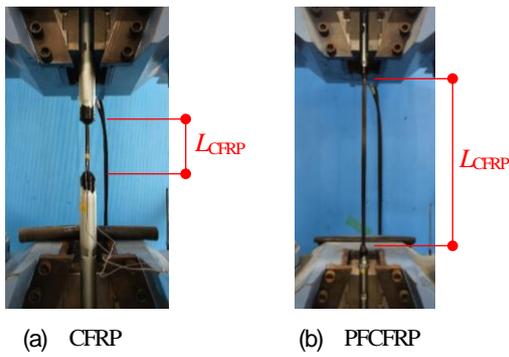


図-5 試験体の様子

(2) 試験結果

図-6 に引張試験から得られた耐力とその平均値 (AVE) ・変動係数 (CV) , 図-7 に荷重—平均歪関係, 図-8 に破壊モードの例を示す. 平均歪は, 試験機から得られたクロスヘッド変位を TB 胴の間隔 (図-5 中の L_{CFRP}) で除した値である. 図-6 には, 表-1 に示す炭素繊維の強度から算出した耐力, さらにブレース材としての応用を想定していることから M16, M20 の鋼製 TB 主材の耐力も併せて示している. 鋼製 TB 主材の耐力は, その材料である SNR400B の降伏応力度の上限値 355MPa に断面積をかけたものを各 TB 径に対応する TB-YP として, 引張強さの上限値 510MPa に断面積をかけたものを各 TB 径に対応する TB-TS としている. すなわち, PFCFRP の耐力が TB-YP を超える場合は鋼製 TB 主材の降伏が先行し, さらに TB-TS をも超える場合は鋼製 TB 主材の破断が先行することを意味する.

この結果, 外径 12mm の PFCFRP の耐力は M16 鋼製 TB 主材の最大強さ TB-TS を, M20 の降伏耐力 TB-YP を超えることが明らかとなった. CFRP の引張耐力は表-1 の公称値から計算されたものと比較して, 約 74% の値となった. さらに, CFRP と PFCFRP とを比較すると, 耐力は約 54% に低下していることから, この低下が一部繊維化したことによる影響と考えられる. 耐力の変動係数は, CFRP の場合で約 5%, PFCFRP の場合は約 8% であり, 大きなバラつきは無いと考えられるものの一部繊維化により強度のバラつきも大きくなると言える. 図-7 の荷重—平均歪関係を見ると PFCFRP では破断まで概ね線形的な関係となっているが, CFRP の場合は約 160kN を超えてから, 傾きに変化がみられる試験体が存在する. また, 载荷中に荷重低下が生じている試験体も見られる. これらは, 定着内部での剥離や変形が影響していると考えられ, 次章で分析を行う. 図-8 の破壊モードを見ると, CFRP はホウキ状の材料破壊, PFCFRP は繊維化した部分での材料破壊となった. PFCFRP では円形断面の外側の繊維は破断しているのに対し, 円形断面中心部の繊維は破断していないものも見られたことから, 繊維に作用している軸力が一定ではなく, またその差がマトリックス

樹脂がないことで平準化されていないものと推測できる. これが原因として前述の CFRP と PFCFRP との耐力の差が生じたと考えられる.

なお, 図-8 の CFRP の破壊モードから, 試験区間内での材料破壊が得られていること, 鋼管に膨張セメントを充填する方法で実施する CFRP の材料試験で見られる破壊モードと同様であることから, 本章で採用した定着法は, 高強度材料で引張材料試験が困難な場合がある CFRP 材の材料試験法としても利用できることが示された.

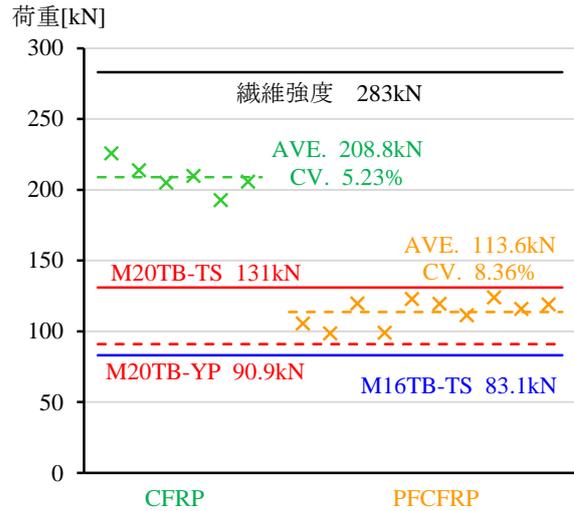


図-6 外径 12mm の CFRP/PFCFRP の耐力

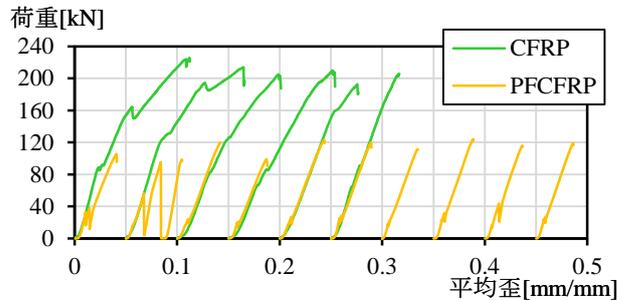


図-7 荷重—平均歪関係



(a) CFRP (b) PFCFRP

図-8 破壊モード

3. 定着耐力評価

(1) 試験方法

前章の結果より、外径 12mm の PFCFRP は鋼製 TB の M16, M20 サイズへの適用可能性が示唆された。そこで、外径 12mm の CFRP と M16, M20 サイズのパイプ式 TB 胴を用いて定着耐力試験を実施した。図-9 に試験体定着部を、表-3 にその寸法を示す。定着長は、TB 胴の非定着側ネジ部を鋼構造物との接合に使用することを想定して TB 胴全長の約 40% とし、定着側と逆側の TB 胴ネジ部は高強度鋼のネジを接続し、そのネジを介して引張力を作用させる図-3 (a) の A 法で実施した。ただし、試験によりパイプ式 TB 胴の降伏が先行した場合は、同じ試験体を用いて TB 胴を試験機チャックにより直接掴む図-3 (b) の B 法で再度引張試験を実施した。定着法は前章と同様、両端部に楔を打ち込み、TB 胴内で鉄球とエポキシ樹脂により定着した。試験は準静的引張試験とし、M16TB 胴、M20TB 胴それぞれ 10 体実施した。試験体の様子を図-10 に示す。

(2) 試験結果

図-11 に引張試験から得られた耐力とその平均値・変動係数、図-12 に荷重-平均歪関係、図-13 に破壊モードの例を示す。図-11 には、図-6 と同様に M16, M20 の鋼製 TB 主材の耐力（引張強さの最大値）も示している。M16, M20TB 胴それぞれに対して定着試験を行った結果、M16 の場合は A 法により TB 胴の降伏が先行したため B 法による評価結果を、M20 の場合は A 法により定着破壊となったことから A 法による結果を示している。また、図-11、図-12 (a) の M16 における 3 試験体は B 法による試験でも TB 胴の鋼材破断となったため、平均値・変動係数の算出には用いていない。図-11 より、定着耐力の変動係数は約 5% であり大きなバラつきは無いと考えられ、その値は鋼製 M16TB 主材および M20TB 主材の最大強さを超えることが明らかとなった。一方で、図-12 に○で示した点のように最大荷重に到達するまでの過程において、荷重低下が生じる場合が見られる。本研究で採用した定着のメカニズムは、図-14 に示すように、楔によって端部の CFRP 外径が広がることで TB 胴内の定着材に機械的に引掛かることによる抵抗力と、定着材であるエポキシ樹脂材の接着力の 2 種類の定着力である。このうち、接着による抵抗力が早期に剥離したことによって失われた荷重低下であると考えられる。これは、図-13 の破壊モードからも CFRP 端部が材料剪断破壊することで定着抜けとなっていることが確認でき、最終的に耐力を発揮する定着メカニズムは端部に打ち込んだ楔によるものであると言える。従って、接着面の剥離による荷重低下が生じないように定着法の改善を行い、より安定した荷重-変位挙動とすることが今後の課題である。また、楔を打ち込んだことによって CFRP 端部が広がる変形量は TB 胴サイズとは無関係であるため、その耐力には大きな変化は生じないと予想されたが、結果として TB 胴サイズが M16 から M20 に大きくなることで 20% 程度の上昇が確認された。

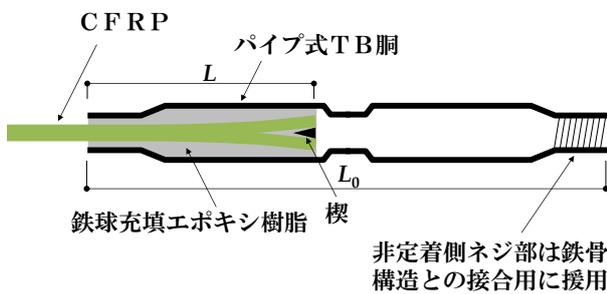


図-9 定着試験体の概要

表-3 定着試験体定着部の寸法

	M16	M20
TB 胴長さ L_0 [mm]	250	300
CFRP 定着長さ L [mm]	100	120

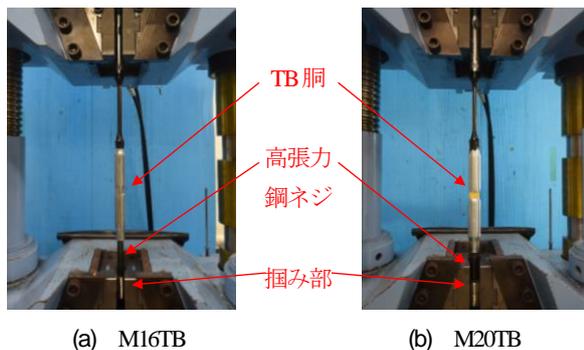


図-10 試験体の様子

動係数、図-12 に荷重-平均歪関係、図-13 に破壊モードの例を示す。図-11 には、図-6 と同様に M16, M20 の鋼製 TB 主材の耐力（引張強さの最大値）も示している。M16, M20TB 胴それぞれに対して定着試験を行った結果、M16 の場合は A 法により TB 胴の降伏が先行したため B 法による評価結果を、M20 の場合は A 法により定着破壊となったことから A 法による結果を示している。また、図-11、図-12 (a) の M16 における 3 試験体は B 法による試験でも TB 胴の鋼材破断となったため、平均値・変動係数の算出には用いていない。図-11 より、定着耐力の変動係数は約 5% であり大きなバラつきは無いと考えられ、その値は鋼製 M16TB 主材および M20TB 主材の最大強さを超えることが明らかとなった。一方で、図-12 に○で示した点のように最大荷重に到達するまでの過程において、荷重低下が生じる場合が見られる。本研究で採用した定着のメカニズムは、図-14 に示すように、楔によって端部の CFRP 外径が広がることで TB 胴内の定着材に機械的に引掛かることによる抵抗力と、定着材であるエポキシ樹脂材の接着力の 2 種類の定着力である。このうち、接着による抵抗力が早期に剥離したことによって失われた荷重低下であると考えられる。これは、図-13 の破壊モードからも CFRP 端部が材料剪断破壊することで定着抜けとなっていることが確認でき、最終的に耐力を発揮する定着メカニズムは端部に打ち込んだ楔によるものであると言える。従って、接着面の剥離による荷重低下が生じないように定着法の改善を行い、より安定した荷重-変位挙動とすることが今後の課題である。また、楔を打ち込んだことによって CFRP 端部が広がる変形量は TB 胴サイズとは無関係であるため、その耐力には大きな変化は生じないと予想されたが、結果として TB 胴サイズが M16 から M20 に大きくなることで 20% 程度の上昇が確認された。

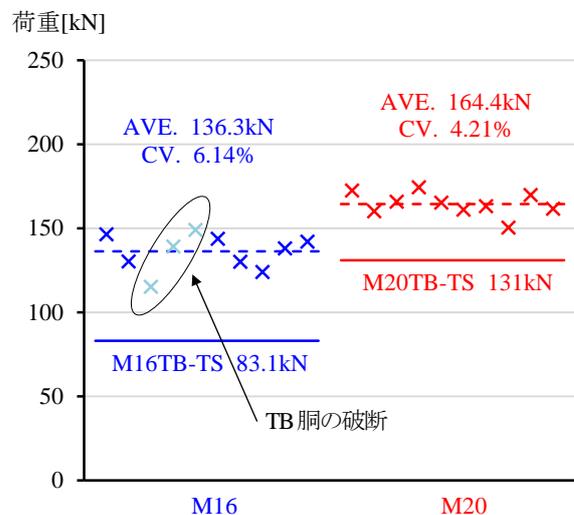
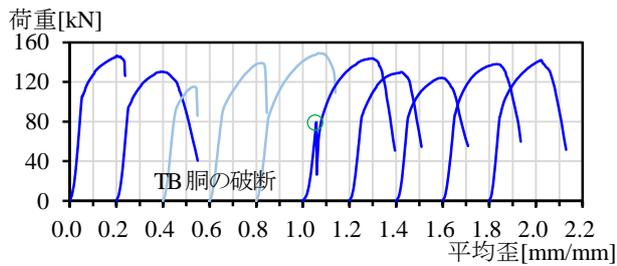
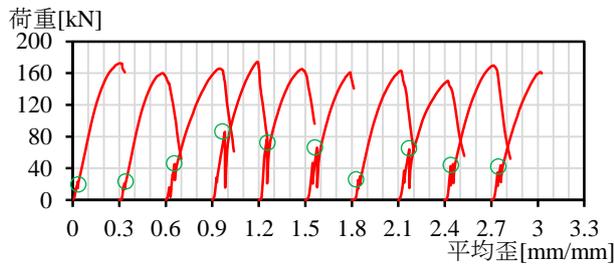


図-11 定着試験結果



(a) M16TB 洞 (B法)



(b) M20TB 洞 (A法)

図-12 荷重-平均歪関係



図-13 破壊モード

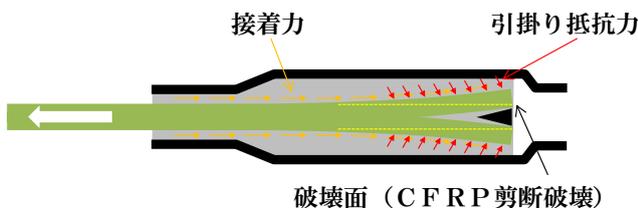


図-14 定着部の抵抗メカニズム

4. 引張負荷除荷繰返し載荷試験

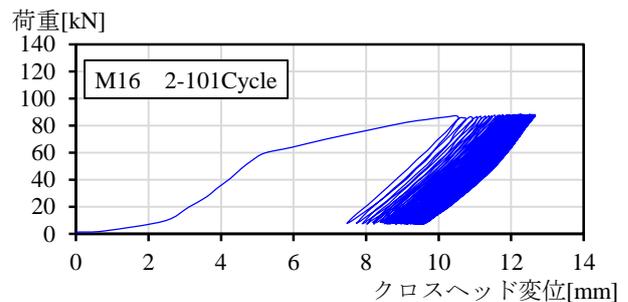
(1) 試験方法

本研究で提案するブレースを耐震ブレース材として使用する際は、地震力による繰返し荷重が作用することから、定着部および PFCFRP の引張負荷除荷繰返し試験を実施した。試験体は、定着部に対する試験として M16、M20TB 洞に CFRP を定着した試験体を各 1 体、PFCFRP の材料試験として M16TB 洞に PFCFRP を定着した試験体を 1 体とした。CFRP を用いた定着部に対する試験の試験体寸法は第 3 章と同様であり、図-3(a)の A 法で実施

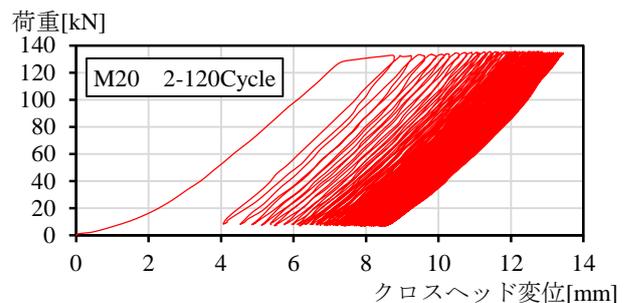
した。PFCFRP に対しては M16TB 洞を使用し、定着部の抜けを生じさせないよう定着長さ L は 180mm とし、図-3 (b)の B 法で実施した。最大引張力は、鋼製 TB 主材の引張強さの上限値を採用し、CFRP と M16TB 洞を使用した定着部試験と PFCFRP を使用した材料試験は最大荷重を 83.1kN、CFRP と M20TB 洞を使用した定着部試験では 131kN として引張負荷除荷加力を行った。また、試験では一度最大荷重まで準静的に加力・除荷を行った後、載荷速度 200kN/min で 100 回以上の繰返し載荷を行った。

(2) 試験結果

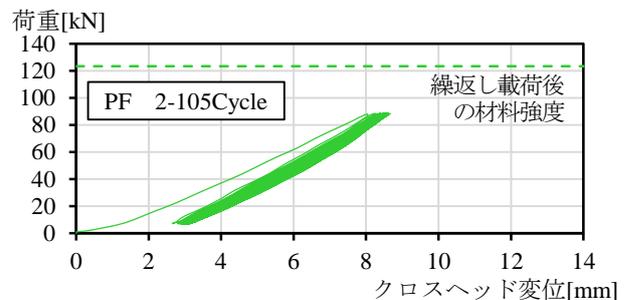
図-15 に引張負荷除荷繰返し試験から得られた荷重-クロスヘッド変位関係を示す。繰返し載荷によって徐々に残留変位が蓄積する傾向がみられるが、目視によって定着部や PFCFRP の破断・損傷は確認できなかった。また、PFCFRP については、105 回の引張負荷除荷載荷の後、準静的引張試験を行って材料強度を評価した結果を図-15 (c)中の破線および図-16 に示している。その結果、



(a) M16TB 洞を用いた定着試験



(b) M20TB 洞を用いた定着試験



(c) M16TB 洞を用いた PFCFRP の材料試験

図-15 負荷除荷繰返し試験結果

図-6 に示した PFCFRP の強度の平均値 113.6kN を超える強度 123.4kN が得られ、引張負荷除荷繰返し载荷による材料強度の低下も無いと考えられる。

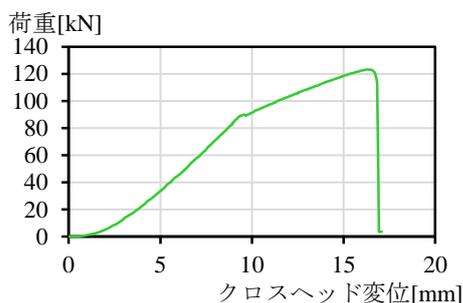


図-16 PFCFRPの引張負荷除荷繰返し後の静的引張試験結果

5. 耐力評価結果の総括

第2章から第4章の結果を踏まえて、本研究で提案するブレース材の耐力評価結果は図-17のように纏めることができる。図-17は縦軸に荷重をとり、耐力目標である鋼製TB主材の降伏軸力の最大値と破断軸力の最大値とともに、試験により得られた外径12mmのCFRPとPFCFRPの材料強度および定着耐力の平均値をプロットしている。横軸にはTBサイズをとり、各TBサイズに対するCFRPとPFCFRPの材料強度、定着耐力を比較できるようにしている。M18に対する試験は実施していないが、CFRPとPFCFRPの材料強度はTB胴のサイズと無関係であるため、定着耐力以外について同図中に示した。これより、鋼製TB主材が塑性変形能力を十分発揮でき、その破断により最大耐力が決定されることが必要とされる場合、外径12mmのPFCFRP材はM16、M18の鋼製TB

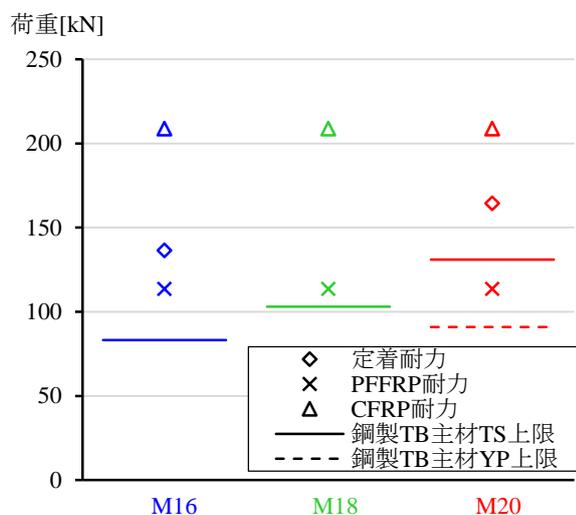


図-17 耐力一覧

ブレースの置き換えとして使用できると考えられる。一方、M20の場合はTBブレース主材の降伏後の歪硬化域においてPFCFRPが破断する可能性があるため、弾性範囲内での適用に限られる。

6. まとめ

本研究ではターンバックルブレースの座屈による被害低減を目的として一部繊維化したCFRP材の開発、定着法の提案を行うとともに、その材料強度と定着耐力評価を行った。その結果、以下のことを示した。

- (1) 引抜成形CFRPの一部を繊維化することで材料強度が約54%に低下する。
- (2) パイプ式ターンバックル胴、楔、鉄球およびエポキシ樹脂を用いた定着法とその耐力を明らかとした。大径のパイプ式ターンバックル胴を用いることで材料試験法としても利用が可能であることが示された。
- (3) 提案したブレースは、外径12mmのCFRPを用いることによって、M16からM20までの鋼製ターンバックルブレースの代替として使用可能であることが示された。

謝辞：本研究は、令和二年 国土交通省 建設技術開発助成制度の一部として行われた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 玉井宏章, 高松隆夫, 松尾彰：ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について, 日本建築学会構造系論文集 第70巻 第595号, pp.131-138, 2005.
- 2) 山口界堂, 高橋治, 立岡善典：高機能繊維の建築構造部材への実用化に関する研究—金物接合と手結びによる接合の開発—, 日本建築学会関東支部研究報告集 第88巻, pp.509-512, 2018.
- 3) 松本幸大, 三枝玄希, 田口孝, 小宮巖, Yoresta Fengky, Phan Viet Nhut, 松井健良, 米谷翼：一部繊維化したFRP材のブレースへの応用に関する基礎検討, 2019年度日本建築学大会(北陸)学術講演概要集, PP.1515-1516, 2019.9.
- 4) 芳谷晴香, 松井健良, P. V. Nhut, F. S. Yoresta, 松本幸大, 小宮巖, 田口孝：一部繊維化したCFRPの建設構造への応用, 強化プラスチック協会誌, pp.182-184, 2019.10.
- 5) 松井健良, 松本幸大, 田口孝, 小宮巖：一部繊維化したFRP材のブレースへの応用に関する基礎検討その2 外径12mmのFRP材の材料強度とその定着耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), Vol.B3, pp.1351-1352, 2020.9.
- 6) 櫻井祥人, 持田泰秀：熱可塑性樹脂を用いた炭素織

- 維ストランドロッドの開発, 第7回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム講演概要集 (CD-ROM), pp.80-87, 2018.
- 7) 建設用先端複合材技術協会: 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物設計・施工マニュアル (案), 2015.
- 8) 土木学会: 複合構造レポート11 土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ, 2014.
- 9) 日本産業規格, JIS A 5541: 建築用ターンバックル胴, 2008.
- 10) ZOLTEK, Products, ZOLTEK PX35 Commercial Carbon Fiber, ZOLTEK HP (閲覧日 2020年8月28日): <https://zoltek.com/products/px35/>

(Received August 28, 2020)

FUNDAMENTAL STUDY OF THE STRENGTH OF PARTIALLY FIBERED FRP AND ITS CONNECTION METHOD

Yukihiro MATSUMOTO, Takayoshi MATSUI, Takashi TAGUCHI
and Iwao KOMIYA

Turnbuckle braces have been widely used for the seismic resistant member of steel structures. Although the compressive resistance of turnbuckle brace is not considered in the structural design, it buckle easily by the compressive force and the buckling deformation leads to the damage of finishing material, local plastic strain concentration and the plastic fatigue failure.

Based on these background, the authors are developing a compressive resistant-free member using CFRP, because of its high strength and light-weight characteristics. In order to achieve the purpose, we adopt the partially fibered CFRP rods to provide the compressive resistant-free braces, and to prevent the out-of-plane buckling deformation. The partially fibered CFRP rods were molded by pultrusion because of its excellent cost-effectiveness, superior mechanical performance and stability. Furthermore, we adopt the pipe turnbuckle body to connect the steel structure and CFRP rods like a sleeve joints to provide easy and useful assembly. In this paper, the applicability of the partially fibered CFRP braces for the structural member is investigated through the material strength of the partially fibered CFRP rods, joint strength of CFRP rods using pipe turnbuckle body.

As the results, it was made clear that the connection strength of the proposed connection method for 12mm CFRP rods using M16 or M20 pipe turnbuckle body is higher than the tensile strength of steel turnbuckle member. And the material tensile strength of 12mm partially fibered CFRP rods was stably evaluated. Eventually, it was suggested that 12mm partially fibered CFRP can be applied to M16 to M20 steel turnbuckle braces.