

(41) 一部繊維化した CFRP 材を用いた 非抗圧性ブレース材の耐久性評価

山本 梨乃¹・樋口 彰悟¹・山崎 陽祐¹・田口 孝²
小宮 巖³・中島 浩二³・松本 幸大⁴

¹正会員 豊橋技術科学大学 大学院 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: {yamamoto.rino.ya, higuchi.shogo.rr, yamazaki.yosuke.cg}@tut.jp

²正会員 矢作建設工業 (株) エンジニアリングセンター
(〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間1533-74)

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

³ 福井ファイバーテック (株) 生産技術部 (〒441-3106 愛知県豊橋市中原町岩西5-1)

E-mail: {i-komiya, k-nakajima}@fukui-fibertech.co.jp

⁴正会員 豊橋技術科学大学 次世代半導体・センサ科学研究所
(〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

E-mail: y-matsum@ace.tut.ac.jp

鋼製ターンバックルブレースは多く利用されているが、圧縮時には早期に座屈し、大変形によって周辺の仕上げ材の損傷やターンバックルブレースの破断が生じる可能性がある。そこで筆者らは、圧縮力が作用せず接合も容易なブレース構造として、軽量・高強度な CFRP 材を既存のパイプ式ターンバックル胴に定着するブレース材の研究開発を行っている。既往の研究では定着・材料試験や実大スケールの水平加力試験を行い、既存鋼製ターンバックルブレースに容易に接合可能であること、圧縮変形時に面外変形を著しく減少できることを確認した。本報告では、衝撃試験やリラクゼーション試験を通して耐久性評価を行い、鋼製ターンバックルブレースが降伏する程度の衝撃荷重でも、提案するブレース材は損傷なく機能すること、実際に使用されるような環境下でも、僅かな緩みが生じる程度で実用上の問題とはならないことを確認した。

Key Words: turnbuckle brace, CFRP, impact tests, relaxation tests

1. 研究背景・目的

鋼製ターンバックル (以下、TB と記す) ブレースは、鋼構造物で多く利用されており、地震等の水平力に対し引張力で抵抗している。しかし圧縮が作用した場合、設計上、圧縮側耐力を無視しているため、圧縮変形時には早期に座屈し、面外への大変形によって仕上げ材が損傷したり、座屈に伴い端部に局所的な塑性化が生じ、繰返し変形することで破断したりする可能性がある。実際に地震による建築物の被害として鋼製 TB ブレースのたわみや破断が報告されている¹⁾。こうした課題に対して既往研究では、部材に圧縮力が作用せず、座屈が生じない接合金具を用いたブレース機構の開発²⁾や、材料自体の圧縮抵抗力を無くすために、繊維ロープを用いること

の有効性³⁾について検討されている。

筆者らは、軽量・高強度な炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP と記す)、また定着に関しては既存のパイプ式 TB 胴を応用して用いることに着目し、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) を使った、圧縮力が作用しないブレース材の開発を進めている⁴⁾。一部繊維化することにより、圧縮時の変形が繊維部分で吸収され、ブレースには引張力のみが作用するため、座屈変形も生じない。加えて、鋼製 TB ブレースを併用しているため、引張時には鋼材の塑性変形能力に期待できる。定着については既存のパイプ式 TB 胴⁵⁾を使用し、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ることで接合が極めて容易で

あり、既存鋼製 TB ブレースからも交換が可能になる。これまでに、パイプ式 TB 胴に定着した PFCFRP 材の材料試験・定着試験、及び実大スケールでの繰り返し水平加力試験を行っており、一部繊維化することで、一部繊維化を行っていない CFRP 棒材と比べ、材料強度は低下するが、既存の鋼製 TB ブレースの代替として使用可能であり、履歴挙動は鋼製 TB ブレースと同様にスリップ型であることや、鋼製 TB ブレースと比べて、面外変形量を著しく低減できることを確認している。しかし、実際に使用する際に懸念される、地震のような、引張と圧縮に切り替わるときに生じる衝撃荷重に対する耐性や、長期間の張力に対する耐久性については確認していない。そのため既往研究での性能評価に加え、耐久性についても評価する必要がある。そこで本研究では、衝撃への耐性を確認するための落下試験と、長期で張力を与えたときの、時間経過によるゆるみや耐久性を把握するためのリラクセーション試験を行った。本論文では試験を通して耐久性評価を行った結果について述べる。

2. 試験体概要

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ており、図-1 のように一定区間において樹脂含浸を行わないことで実現する。また、PFCFRP 材を既存鋼製 TB ブレースに組み込むにあたり、図-2 のようにパイプ式 TB 胴で PFCFRP 材を定着し、反対側のネジ部を用いて接合する手法を用いた。定着方法は、楔によって広げられた CFRP 部分が樹脂で固められた鉄球層に引っかかることで、機械的に抵抗する方法とした。CFRP 材の定着・接合法の検討は既に行っており、PFCFRP 材を組み込んだブレースは既存の鋼製 TB ブレースの代替として使用可能であることを確認している。

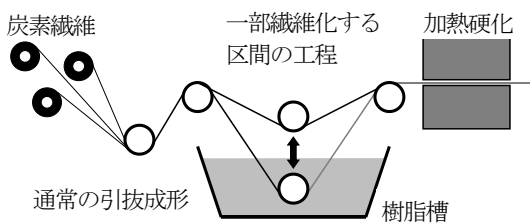


図-1 PFCFRP 材の作成方法⁹⁾

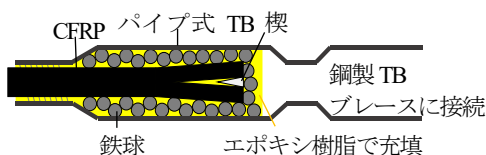


図-2 CFRP 材の定着方法⁹⁾

3. 衝撃試験

(1) 試験方法

衝撃荷重に対する PFCFRP 材の耐久を分析するために、落下試験を行った。試験装置図を図-3 に示す。M16 の鋼製 TB ブレースと外径 12mm の PFCFRP 材、重さ 10kg の錘を用いて、落下高さ 1m、5m、6m、7m、8m を順に各 5 回ずつ試験したもの（以下、①と記す）と、鋼製 TB ブレースを新しいものに変えて落下高さ 8m を 6 回行ったもの（以下、②と記す）の 2 種類の試験を行った。落下方法は所定の高さまで持ち上げた後、錘を手で持ち、落としている。試験時の様子を図-4 に示す。なお、試験で使用した PFCFRP 材は、既往研究⁷⁾で行われた繰り返し水平加力試験で使用されたものである。歪ゲージ位置を図-5 に示す。錘の可動部にはオザック精工・リニアブッシュ LFDMS0-UU、ゴムシートには MISUMI・20mm 天然ゴムシート BMSET20-100-100 を使用している（図-6）。試験体の鋼製 TB ブレースの材料試験を行ったところ、①で使用した鋼製 TB ブレースの降伏応力は 316MPa、引張強さは 458MPa、降伏歪は 1502 μ 、②で使用した鋼製 TB ブレースの降伏応力は 310MPa、引張強さは 437MPa、降伏歪は 1505 μ であった。

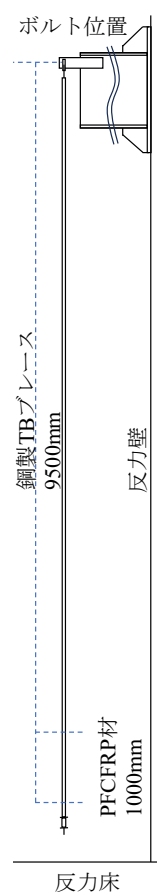


図-3 試験装置図

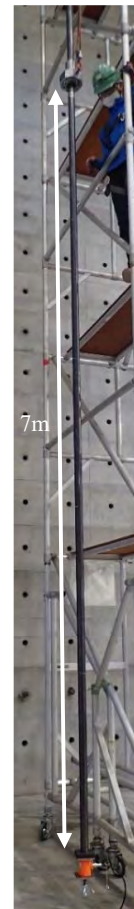


図-4 試験時の様子(7m①)

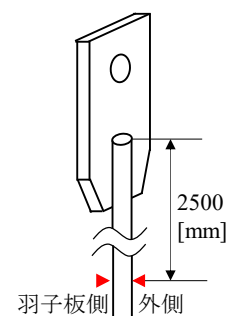


図-5 歪ゲージ位置

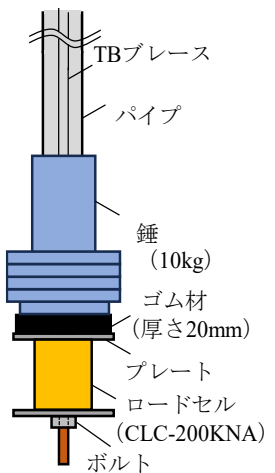


図-6 試験体下端部概要

(2) 試験結果

表-1に2本の歪ゲージの平均歪の最大値を、図-7に歪-時間関係を示す。①の8mは3回目で歪ゲージが断線したため計測できていない。変動係数CV[%]は小さく収まっており、高さが高くなると歪も大きくなる傾向がみられるが、図-7より、最大歪の後圧縮側になり、錘が再び落下し衝撃を与える前に引張側に戻るような挙動は高さによらず共通している。また、①の結果より5mから、鋼製TBブレースの材料試験で得られた静的な降伏歪を超えており、8mでは一部降伏して黒皮がはがれた鋼製TBブレースを繰り返し使用した試験となった。しかし、表-1、図-7のどれも①と②を比較すると差はなく、②の試験で残留歪の確認をしたが10μ程度であったため、どちらの試験体も歪ゲージ位置は弾性のままであると考えられる。

ここで落下高さ h から錘を落とした時の衝撃荷重 P を考える。錘の持っていた位置エネルギーが、すべて鋼製TBブレースの歪エネルギーに置き換えられたと考えると、

$$mg(h+d) = \frac{1}{2}Pd \quad (1)$$

となる。よって衝撃荷重 P は式(2)で算出できる。

$$P = \frac{2mg(h+d)}{d} \quad (2)$$

m : 錘の重さ, g : 重力加速度, d : 伸び (部材長×歪)

今回、部材長は鋼製TBブレースとPFCFRP材で区別していない。実験結果の最大荷重と式(2)から算出した衝撃荷重を表-2に、荷重-時間関係を図-8に示す。表-2の実験結果と図-8を確認すると、歪と同様に高さによって最大荷重は変化しており、時刻歴の概形は変化がなく、①と②の差も見られなかった。しかし、CVを見ると歪の結果よりバラつきが大きく、高さによってもバラつきの違いが見られた。実験結果と式(2)の値を比較す

ると、5m①のNo.3を除いて式(2)の値が大きく、その差と落下高さとの相関性は見られず約10~30kNであった。今回実験では、錘とロードセルの間にゴムを設置しているため、鋼製TBブレースの伸び以外にゴムの縮みが考えられるが、式(1)、(2)ではゴムの変形については考慮していない。それが要因の1つとして差が生じたと考えられる。

②の試験前後の試験体写真を図-9~12に示す。図-9から分かるように試験体上端は、黒皮がはがれる程度の降伏が生じていた。また図-10、11より、試験前後でボルト穴が楕円状に変形していること、羽子板が曲がっている様子が確認できる。しかし図-12から分かるようにPFCFRP材には損傷がなく、また、パイプ式TB胴からPFCFRP材が抜け出している様子は確認できなかった。このことから衝撃荷重が作用した際、鋼製TBブレースより先にPFCFRP材に損傷が生じることはないと考えられる。

表-1 平均歪の最大値[μ]

	1m①	5m①	6m①	7m①	8m①	8m②
No.1	591	1361	1574	1567	1593	1726
No.2	619	1473	1583	1546	1532	1804
No.3	607	1558	1599	1593	-	1860
No.4	643	1488	1502	1560	-	1787
No.5	619	1491	1504	1517	-	1779
No.6	-	-	-	-	-	1713
平均	616	1474	1552	1557	1563	1778
CV[%]	2.77	4.32	2.64	1.61	1.95	2.76

表-2 実験と式(2)から得られた最大荷重[kN]の比較

	1m①		5m①		6m①		7m①		8m①		8m②	
	実験	式(2)	実験	式(2)	実験	式(2)	実験	式(2)	実験	式(2)	実験	式(2)
No.1	13.23	31.20	48.60	67.49	53.86	70.04	56.05	82.08	68.42	92.17	60.90	85.07
No.2	14.83	29.78	50.47	62.37	51.80	69.62	57.71	83.10	62.63	95.84	55.98	81.41
No.3	15.16	30.36	61.37	58.96	55.65	68.95	55.98	80.70	59.18	-	60.24	79.00
No.4	16.16	28.69	47.34	61.73	57.91	73.37	57.38	82.41	80.85	-	68.88	82.22
No.5	18.35	29.78	48.21	61.63	54.99	73.28	57.65	84.73	72.21	-	66.76	82.59
No.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	72.87	85.75
平均	15.55	29.96	51.20	62.44	54.84	71.05	56.96	82.60	65.53	94.00	64.27	82.67
CV[%]	10.87		10.13		3.68		1.36		11.57		8.93	

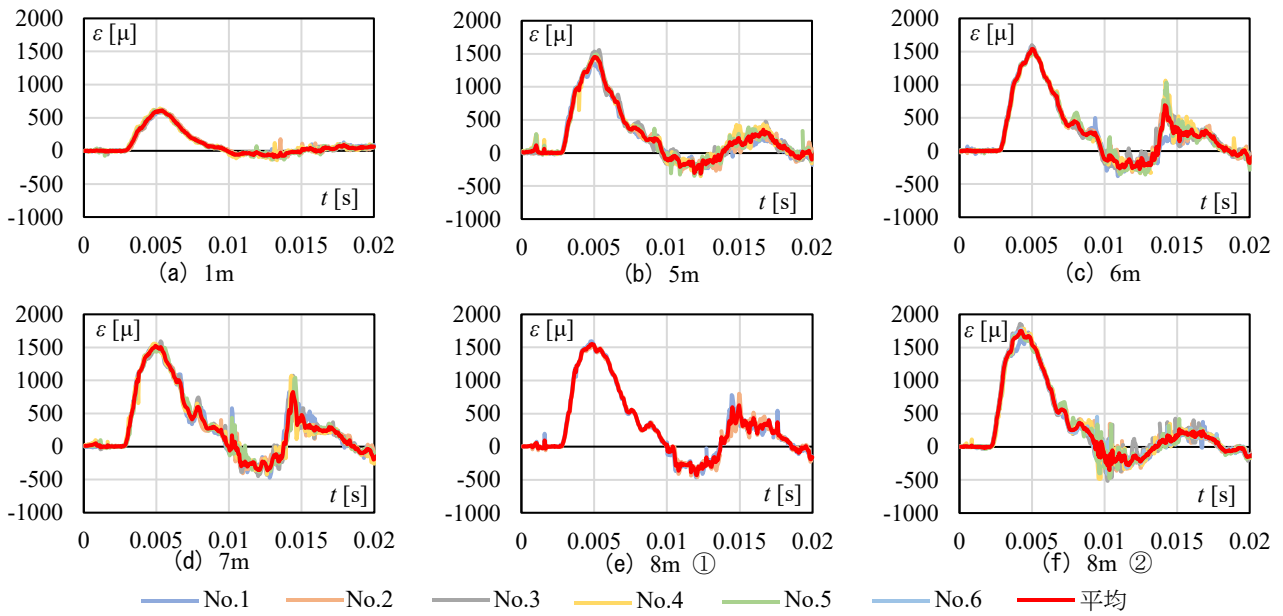


図-7 歪時間関係

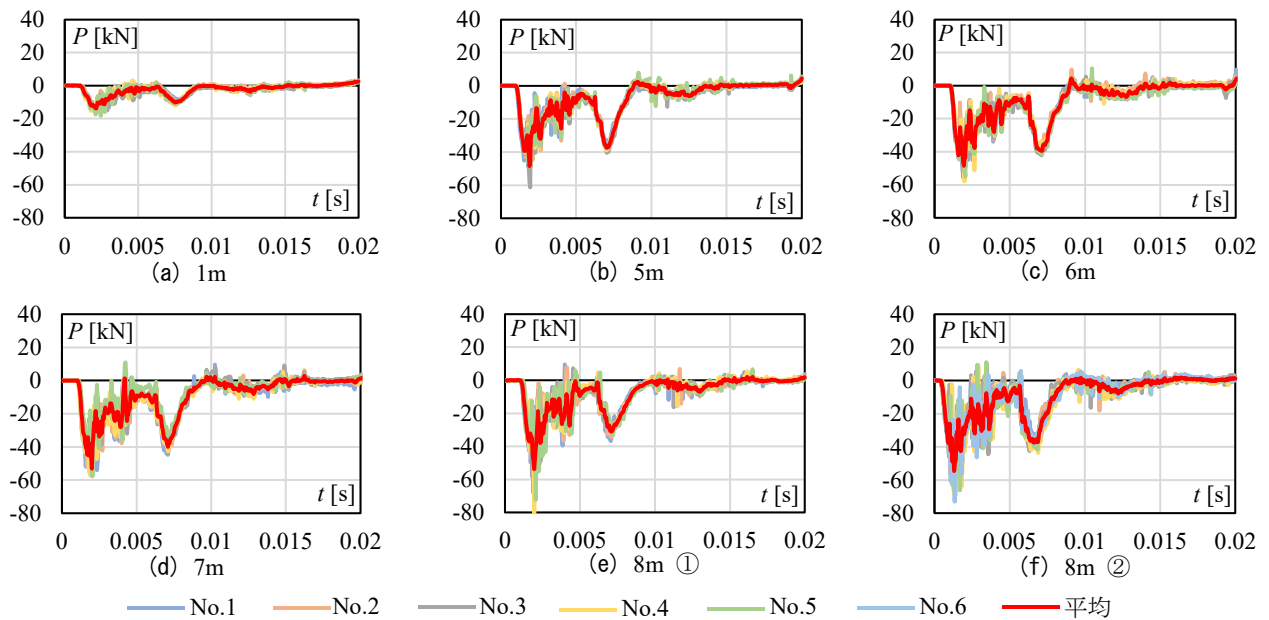


図-8 荷重-時間関係



図-9 試験後試験体上端

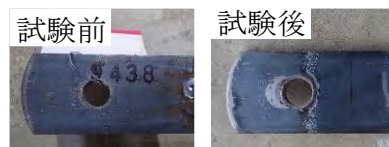


図-10 試験前後ボルト穴



図-11 試験前後羽子板



図-12 試験後PFCFRP材

4. リラクゼーション試験

(1) 試験方法

2023年6月20日から試験体2体でリラクゼーション試験を行った。本試験では形鋼を反力部材とした自己鈎合形式で実施している。図-13 に試験装置写真及び計測位置・寸法を示す。設置場所は実際に PFCFRP 材ブレースが使用される環境を想定し、屋内で直射日光が当たらない場所に設置した。歪ゲージを衝撃試験と同様に、羽子板側と外側の2枚と温度計2個を図-13 の位置に設置し、1時間に1回、30秒間10Hzで計測している。試験1回目として、開始時に鋼製 TB ブレースに工具なしで緊張できる限界程度の歪である約 75 μ の張力を与え1ヶ月間計測を行った。次に試験2回目として、張力を1度緩めて前回の3倍程度になるように締め直し、約 220 μ の張力のもと再び1ヶ月間計測を行った。

(2) 試験結果

計測開始から1回目と2回目の歪と気温の時刻歴変化を図-14 に示す。試験体1, 2の歪は2本の歪ゲージの平均を示している。(a)より、引張歪75 μ で1ヶ月間の計測ではリラクゼーションは確認できなかった。また、この期間は気温が約10 $^{\circ}$ C上昇しているが、気温による歪の変化も見られなかった。(b)では気温が30 $^{\circ}$ C前後と比較的一定な温度変化で、歪には温度との相関性は見られなかった。試験体2では開始2週間で歪が10%程度低下したが、その後は一定で低下は見られない。1回目よりも張力が大きいことが原因で、わずかにリラクゼーションが生じた可能性がある。今後、リラクゼーション試験を続け、張力のパラメータや、使用期間の長さの影響があるか確認が必要である。

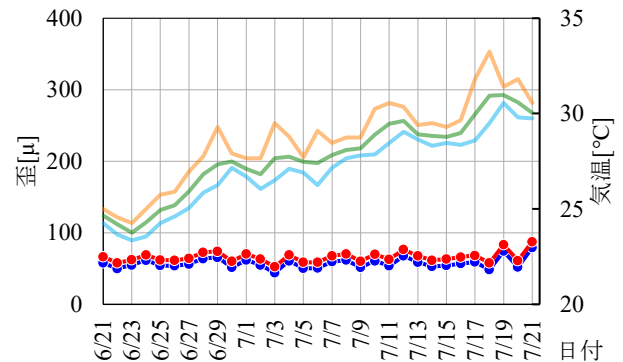
5. まとめ

本研究では、PFCFRP 材の耐久性評価を目的として、衝撃試験とリラクゼーション試験を実施した。その結果、以下の知見を得た。

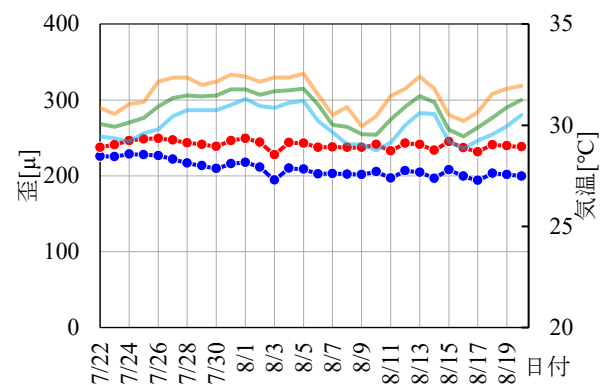
- (1) 錘による衝撃落下試験において、鋼製 TB ブレースの黒皮がはがれたり、ボルト孔の塑性変形が生じたりするような衝撃荷重が生じて、PFCFRP 材は

損傷なく機能することができる。

- (2) リラクゼーション試験において、温度変化や長期で張力が与えられるような、実際に使用される環境下でも、実用上の支障が危惧される程度の緩みは生じないことを確認した。



(a) 1回目 時刻歴



(b) 2回目 時刻歴

● 試験体1 ● 試験体2 ● 各日の最高気温
— 各日の最低気温 — 各日の平均気温

図-14 歪と気温の時刻歴変化

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成23年(2011年) 東北地方太平洋沖地震被害調査研究(速報), 2011.
- 2) 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.

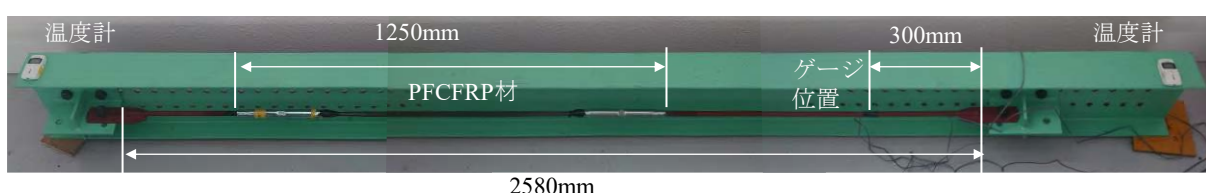


図-13 試験装置写真及び計測位置・寸法

- 3) 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.
- 4) 松本幸大, 松井健良, 田口孝, 小宮巖: 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, 第8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.128-134, 2020.
- 5) 濱崎瑞生, 松本幸大, 田口孝, 清水啓介, 小宮巖, 中島浩二: 一部繊維化したCFRP材による非抗圧性ブレース材の提案と性能評価, 第14回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集(CD-ROM), 8pages, 2021.
- 6) 濱崎瑞生, 松本幸大, 田口孝, 清水啓介, 小宮巖: 一部繊維化したCFRP材による非抗圧性ブレースの提案と実大試験による性能評価, 日本建築学会 技術報告集, 第28巻 第70号, pp.1248-1253, 2022.
- 7) Mizuki Hamasaki, Rino Yamamoto, Takashi Taguchi, Keisuke Shimizu, Iwao Komiya, Koji Nakajima, Yukihiro Matsumoto: Performance of compression-free turnbuckle braces using partially fibered CFRP under cyclic load, *Construction and Building Materials*, Volume 366, 130149, 2023.
- 8) JISA5541 (2008) : 建築用ターンバックル胴

(Received August 25, 2023)

DURABILITY TEST OF COMPRESSION-FREE BRACES USING PARTIALLY FIBERED CFRP

Rino YAMAMOTO, Shogo HIGUCHI, Yosuke YAMAZAKI, Takashi TAGUCHI, Iwao KOMIYA, Koji NAKAJIMA and Yukihiro MATSUMOTO

Although steel turnbuckle braces are widely used, and their design neglects the compressive load-carrying capacity, the buckling caused by compressive deformation may cause damage to the finishing material and rupture of the turnbuckle brace due to large deformation. Therefore, the authors have been researching and developing a brace system in which lightweight, high-strength CFRP material is anchored to pipe-style turnbuckle bodies where compressive forces do not act, and joints can be easily made. In previous studies, we have conducted anchorage and material strength tests and full-scale horizontal cycle loading tests and confirmed that the brace can be easily connected to existing steel turn-buckle braces and that out-of-plane deformation can be significantly reduced. This paper describes the results of performance evaluation through drop impact tests and relaxation tests. As the results, it was confirmed that the proposed brace would function without damage even under impact loads that would cause the steel turnbuckle brace to yield, and that no relaxation would occur under conditions like those in which the brace would be used.