

複合材料を使用した非抗圧性ブレースの衝撃加力試験

IMPACT LOADING TEST OF COMPRESSION FREE BRACE USING COMPOSITE MATERIAL

山崎陽祐 — * 1 樋口彰悟 — * 1
田口 孝 — * 2 伊藤花恋 — * 3
小宮 巖 — * 4 松本幸大 — * 5

Yosuke YAMAZAKI — * 1 Shogo HIGUCHI — * 1
Takashi TAGUCHI — * 2 Karen ITOH — * 3
Iwao KOMIYA — * 4 Yukihiro MATSUMOTO — * 5

キーワード：
ターンバックル, ブレース, CFRP, 衝撃試験

Keywords:
Turnbuckle, Brace, CFRP, Impact loading test

Although slender steel braces are widely used, they buckle prematurely in compression load, and several damages will occur by the deformation. Therefore, the authors have been researching and developing bracing materials in which lightweight, high-strength CFRP materials are anchored to standard pipe-type turnbuckle bodies. Previous studies showed that the material can be easily joined to existing turnbuckle-type braces and can significantly reduce out-of-plane deformation during compressive deformation. This paper shows the impact loading method and conducts to confirm the structural performance under impact loads.

1. はじめに

鋼製ターンバックル（以下、TB と記す）ブレースに代表される細長比の大きいブレース材は、鋼構造物で広く利用されており、地震等の水平力に対し引張力で抵抗している。圧縮が作用した場合、設計上、圧縮側耐力を無視しているが、圧縮時の座屈とそれに伴う面外への大変形により周辺の仕上げ材が損傷したり、TB ブレース端部での局所的な繰り返し塑性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がすすめられたり²⁾、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について検討がされたりしている³⁾。筆者らは、ブレース材の一部に軽量・高強度な炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRP と記す）棒材を用い、さらに定着・接合に関しては既存のパイプ式 TB 胴⁴⁾への埋め込み定着を採用することで、図 1 に示すような圧縮力が作用しないブレース材の研究開発を進めている⁵⁾⁻⁸⁾。この圧縮力が作用しない非抗圧性の実現には、図 2 に示すように 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）を用いることとし、一部繊維化することで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抵抗できる。また、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利点も有する。定着・接合に既存のパイプ式 TB 胴を使用する理由は、その両端に加工されているネジ部のうち、CFRP 棒材との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、既存の TB ブレースからも交換が可能になるためである。これまでの研究開発では、パイプ式 TB 胴に定着した PFCFRP 材の材料試験・定着試験、およ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、既存の鋼製 TB ブレースと併用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パ型であることや、鋼製 TB ブレースと比べて、圧縮変形時に面外変

形を顕著に低減できることなどを確認している⁵⁾⁻⁸⁾。

一方、既往の鋼製引張ブレースや座屈の回避機構を備えたブレースにおいては、地震時の圧縮側の変形状態から引張側に移行する際には衝撃的に軸力が作用すると考えられる。筆者らが提案している非抗圧性ブレースを含め、地震時を想定した動的な加力試験によってブレース材の挙動を検証した事例は少ない。また、実際のブレース材の動的な挙動の把握には、振動台を用いるなどの大規模な試験が必要となる⁹⁾ため、それ以外の簡易な試験により衝撃力に対する耐久性を把握できると、性能評価法として有用である。以上を踏まえ、本報告では、ブレース材に錘の落下によって衝撃荷重を負荷する落下試験を提案し、ブレース材の衝撃荷重に対する性能評価を試みる。さらに、PFCFRP 材に対して実施した試験結果について報告する。

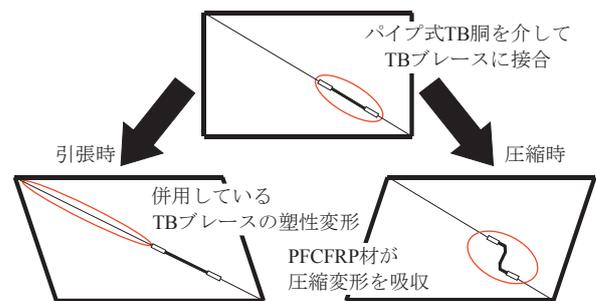


図 1 提案する PFCFRP ブレースの概要

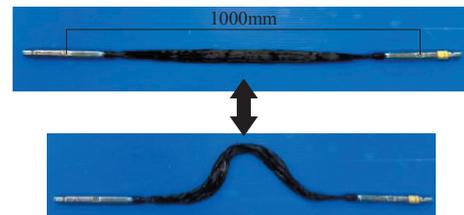


図 2 PFCFRP 材

*1 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)
*2 矢作建設工業(株)エンジニアリングセンター 博士 (工学)
*3 矢作建設工業(株)エンジニアリングセンター
*4 福井ファイバテック(株) 博士 (工学)
*5 豊橋技術科学大学 次世代半導体・センサ科学研究所 建築・都市システム学系 博士 (工学)

*1 Graduate Student, Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech.
*2 YAHAGI CONSTRUCTION CO., LTD., Dr. Eng.
*3 YAHAGI CONSTRUCTION CO., LTD.
*4 Fukui Fibertech Co., Ltd., Dr. Eng.
*5 IRES², Dept. of Arch. and Civil Eng., Toyohashi Univ. of Tech., Dr. Eng.

2. 試験方法

PFCFRP材の衝撃荷重に対する構造性能の確認を目的として、錘の落下による衝撃加力試験を行った。TBブレース主材の長さは9500mm、PFCFRP材の長さは1000mmである。図3に試験装置図を、図4に試験体の設置状況をそれぞれ示す。図3にはひずみゲージによるひずみ測定位置(上端から2500mm)、および、パイプ式TB胴をロードセルとして機能させた荷重測定位置(上端から5000mm)を併せて示す。TBブレース主材のひずみの測定には2枚のひずみゲージを用いてひずみの平均値を算出し、衝撃荷重の測定には8枚のひずみゲージを用いて、4枚1ゲージ法により得られた2カ所の衝撃荷重の平均値を算出した。ひずみの計測周波数は50,000Hzとした。図5にパイプ式TB胴に貼付したひずみゲージの4枚1ゲージ法による荷重計測の概要を示す。図5(a)に示すように、パイプ式TB胴の中央部の平部と角部にそれぞれ4枚のひずみゲージを貼付している。衝撃加力試験では、ひずみと引張荷重との関係を引張試験で評価し、ロードセルの代替として用いている。衝撃加力試験の前後に実施した、引張試験によって得られた荷重-ひずみ関係と傾き、および、校正係数、決定係数を図5(b)~(e)に示す。試験前の引張試験では、5kNからTBブレース主材の保証荷重である40kNの範囲における荷重-ひずみ関係から傾きを算出している。また、試験後にはTBブレース主材の破断まで引張試験を実施している。この結果、5kNから60kN程度の範囲における荷重-ひずみ関係から計算した傾きは線形関係にあること、衝撃加力試験前後の傾きの差は±1.0%未満であることを確認している。

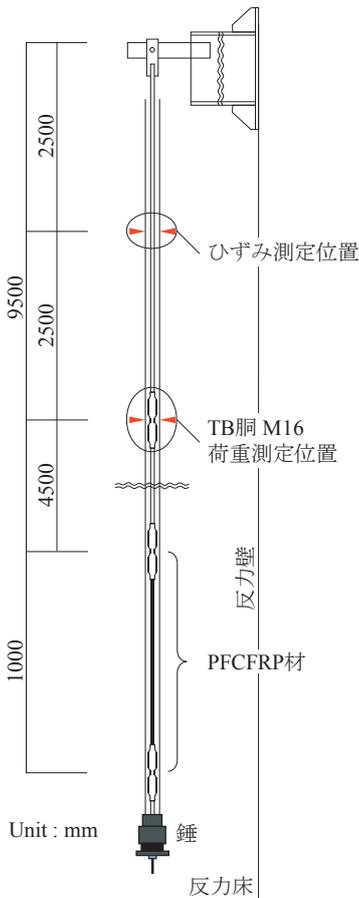


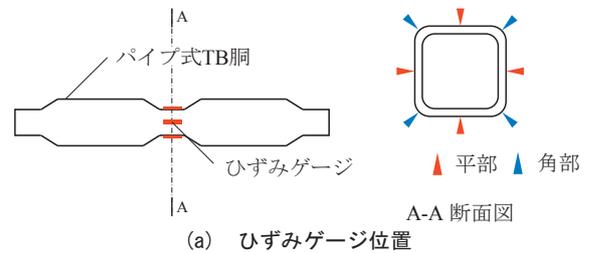
図3 試験装置図



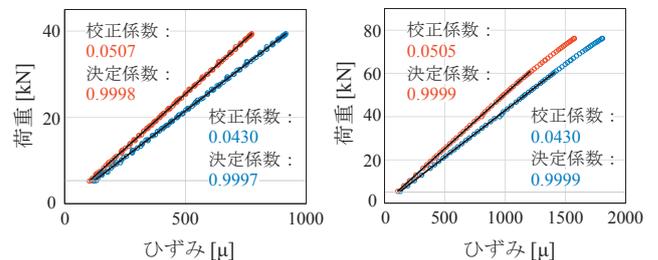
図4 試験体設置状況

衝撃加力試験は、M16のTBブレース主材と外径12mmのPFCFRP材、重さ15kgの錘を使用し、落下高さ1m、3m、5m、7m、8mの順に落下高さを漸増させ、10回ずつ実施したものと、TBブレースを新しいものに替えて落下高さ8mを1回実施したものの2種類の試験を行った。図6に試験名称を示す。①-Aは落下高さを漸増させたlot A、①-Bは落下高さを漸増させたlot B、②-Bは落下高さ8mを1回実施したlot Bである。①-Aと①-Bでは、TBブレース主材の製造ロットとPFCFRP材が異なり、①-Bと②-Bではそれらが同じものを用いている。試験方法は、全ての落下高さについて、錘を所定の落下高さまで持ち上げた後、手で支持してから解放することによって、鋼管(外径48.6mm)に沿って落下する試験方法とした。

TBブレース主材の静的な降伏点を把握することを目的として、試験体に用いたTBブレース主材と同ロットのものについて5体の材料試験を実施した結果の平均値は、ロットA、Bそれぞれについて、降伏荷重が52.1kN、52.7kN(降伏応力が310MPa、321MPa)、破断荷重が76.4kN、76.6kN(引張強さが471MPa、454MPa)、降伏ひずみが1476 μ 、1498 μ であった。

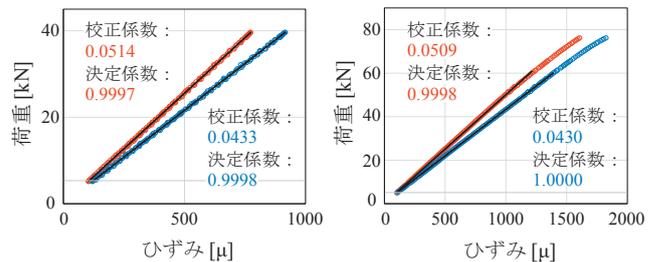


(a) ひずみゲージ位置



(b) 試験前 (①-A・①-B)

(c) 試験後 (①-A・①-B)



(d) 試験前 (②-B)

(e) 試験後 (②-B)

図5 TB胴のひずみによる荷重計測の概要

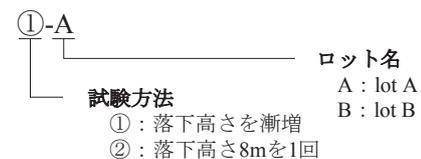


図6 試験体名称

図 7 に試験体下端部の概要図を示す。鋼管に沿って落下する錘の可動部には、フランジ付リニアブッシュ（内径 50mm, オザック精工 LFD50-UU）を、ゴムシートには厚さ 30mm のクロロプレンゴム板（硬度 65）を使用している。また、衝撃加力時の試験体下端部を観察するために、高速度カメラ（フォトロン FASTCAM Mini AX200）を使用し、撮影周波数は 5,000Hz とした。なお、本試験で使用した PFCFRP 材は、既往研究^{7,8)}で用いられた静的繰り返し水平加力試験で使用されたものを再利用している。

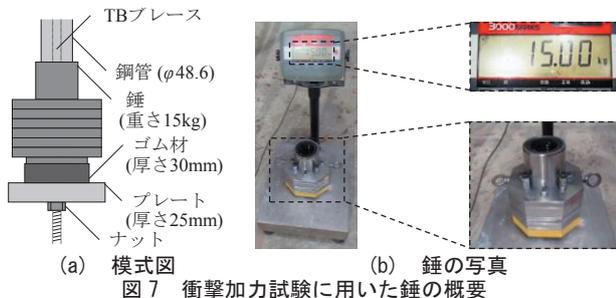
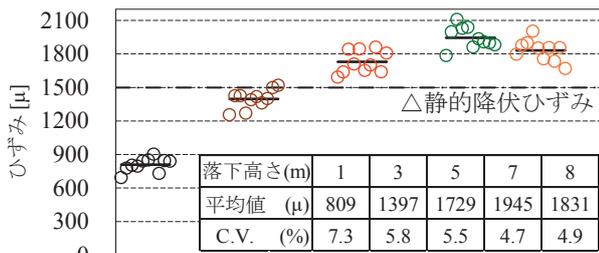


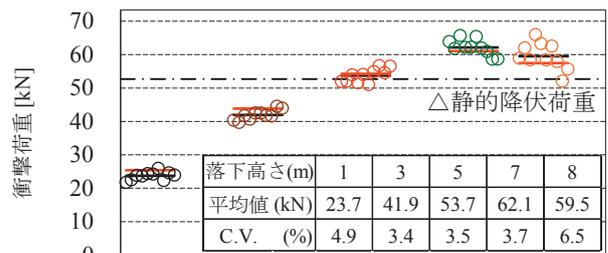
図 7 衝撃加力試験に用いた錘の概要

3. 試験結果

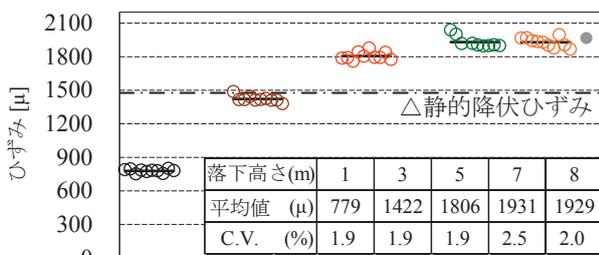
図 8 に衝撃加力試験から得られた各落下高さでの最大ひずみの平均値、および、最大衝撃荷重の結果をそれぞれ示す。なお、①-B で落下高さ 7m の 4 回目においては、ひずみゲージが断線したために、ひずみ値が計測できていない。同様に、①-B で落下高さ 8m において、パイプ式 TB 胴の角部のひずみゲージが断線したため、平部の結果のみを示している。図中には、実施した 10 回の平均値と変動係数 (C.V.) を併せて示す。また、図 8(b), (d) には最大ひずみの平均値から算出した衝撃荷重の計算値を赤線で示している。平均値と計算値はおおむね一致していることが確認できる。図 8 の結果より、各落下高さにおける最大ひずみ、および、最大衝撃荷重は共に変動係数は低く、バラつきは小さいが、荷重に関しては落下高さが高くなると変動係数がやや増加する傾向となった。



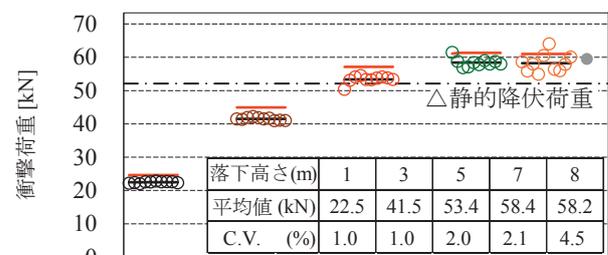
(a) 最大ひずみの平均値 (A)



(b) 最大衝撃荷重 (A)



(c) 最大ひずみの平均値 (B)



(d) 最大衝撃荷重 (B)

○ 1m① ○ 3m① ○ 5m① ○ 7m① ○ 8m① ● 8m②

— 平均値 — 計算値

図 8 衝撃加力試験の結果一覧

各落下高さで実施した試験のうち、図 9 に①-B、および、②-B の各落下高さの代表的な時刻歴であるひずみ-時間関係を、図 10 に①-B、および、②-B の衝撃荷重-時間関係をそれぞれ示す。図 8 と併せて確認すると、①の結果より、落下高さ 5m の試験以降、TB ブレース主材の材料試験で得られた静的な降伏値（降伏ひずみ、降伏荷重）を超えていることが確認できる。また、落下高さ 7m の試験において、黒皮の剥がれが確認されており、その後の試験は TB ブレース主材の一部が降伏した状態での TB ブレース主材を繰り返し使用した試験となった。そのため、落下高さ 7m と 8m の間には、ひずみと荷重の値に大きな変化が見られなかったと考察される。また、図 8~10 より、①と②を比較すると差はなく、②の試験で残留ひずみの確認したところ 10μ 程度であったことから、どちらの試験体もひずみ測定位置は弾性のままであったと考えられる。

図 11 に高速度カメラより記録された、①-B の落下高さ 1m、および、7m での試験体下端部の様子をそれぞれ示す。図中には接触時を 0s として、0.0020s 前、接触時、および、最大変位時の各フレームを示す。図 11(a), (d) より、落下速度は落下高さが高くなると速くなることが確認できる。しかし、図 11(c), (f) より、最大変位を記録したフレーム数に大きな差はなく、錘がゴムシートに接触し、最大変位に至るまでの時間である衝撃継続時間は、落下高さに関わらずおおむね一定であることが確認できた。各落下高さで実施した 10 回の平均衝撃継続時間は、1m で 0.0056s、3m で 0.0055s、5m で 0.0056s、7m で 0.0057s、8m で 0.0055s であった。また、接触フレームの 10~20 フレーム前の錘の位置から算出した錘の平均落下速度と、自由落下の理論式から算出した速度とを比較すると、1m で-2.45%、3m で-0.46%、5m で-0.43%、7m で 1.36%、8m で-0.93% であり、錘は理論とおおむね一致する速度で落下していることを確認した。

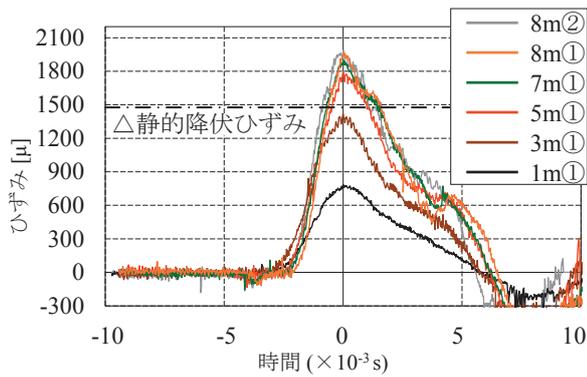


図9 ひずみ-時間関係 (①-B・②-B)

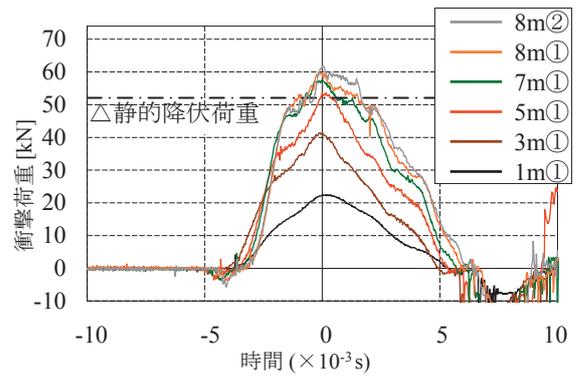


図10 衝撃荷重-時間関係 (①-B・②-B)

図12に①-Bの高速度カメラより評価された各落下高さでの最大変位と、TBブレース主材のひずみから換算した変位、および荷重から換算した変位の結果一覧を示す。変位は、図7中に示すプレート(厚さ25mm)を基準として、画像上のピクセル数を校正することで算出した。ひずみと荷重から変位 δ への換算は次式を用いた。

ひずみからの評価

$$\delta = \varepsilon_{steel} L_{steel} + \varepsilon_{PFCFRP} L_{PFCFRP} \quad (1)$$

荷重 (TB 胴のひずみ) からの評価

$$\delta = P \left(\frac{L_{steel}}{E_{steel} A_{steel}} + \frac{1}{k_{PFCFRP}} \right) \quad (2)$$

ここで、

ε_{steel} 、 ε_{PFCFRP} は、それぞれ鋼製 TB ブレースと PFCFRP 材のひずみであり、前者は実験から計測された値、後者は鋼材のひずみ値を CFRP 材との弾性係数比を用いて換算した値

L_{steel} 、 L_{PFCFRP} は、それぞれ鋼製 TB ブレースと PFCFRP 材の部材長であり、それぞれ $L_{steel} = 9.5\text{m}$ 、 $L_{PFCFRP} = 1.0\text{m}$

P は TB 胴のひずみから換算された荷重

E_{steel} 、 A_{steel} は、それぞれ鋼製 TB ブレースの弾性率と断面積

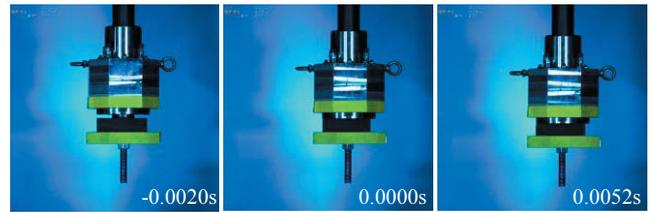
k_{PFCFRP} は、PFCFRP 材の軸剛性であり、本研究で使用した

PFCFRP 材は既往研究⁸⁾で引張試験により軸剛性が評価されており、その値は 16.6kN/mm

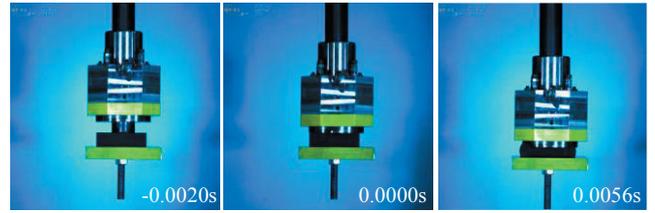
である。

落下高さ 1m から 5m まではおおむね一致しているが、7m、および、8m では高速度カメラより記録された最大変位のみが大きく評価されていることが確認できる。これは、落下高さ 7m 以降で TB ブレース主材の一部が降伏したことにより、TB ブレース主材が塑性化しているためであり、弾性範囲に留まった TB ブレース主材のひずみゲージ位置や衝撃荷重 (パイプ式 TB 胴のひずみ) からの評価が過小評価となっている。

図13に試験後の試験体上端部の様子を示す。試験体上端部では黒皮が剥がれといった明確な降伏が生じていた。図13(a)に示す①は TB ブレースを繰り返し使用した試験となったため、図13(b)に示す②に比べて、広範囲にわたって黒皮の剥がれが確認できる。また、試験後には、羽子板部での曲がりやボルト穴が楕円状に変形している状況も観察されたが、PFCFRP 材には損傷や破断が生じていないことが確認された。このことから衝撃荷重が作用した際においても、TB ブレース主材より先に PFCFRP 材に損傷が生じないことが示された。

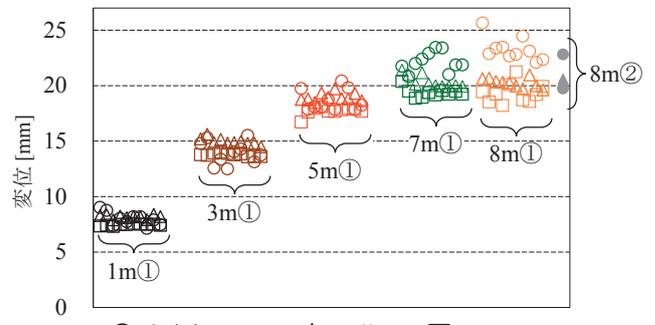


(a) 0.0020s 前(1m) (b) 接触(1m) (c) 最大変位(1m)



(d) 0.0020s 前(7m) (e) 接触(7m) (f) 最大変位(7m)

図11 高速度カメラの写真 (①-B)



○ 高速度カメラ △ ひずみ □ 衝撃荷重
図12 各計測データから評価した最大変位 (B)



(a) 8m①試験後



(b) 8m②試験後

図13 試験後の試験体上端部

4. まとめ

本研究では、圧縮力に抵抗しない非抗圧性ブレースにおいて、地震時に想定される圧縮変形から引張変形に移行する際の挙動を、錘の落下による衝撃加力試験によって評価した。非抗圧性ブレースは既往研究で静的挙動を検証した繊維強化複合材料であり、その構造性能を併せて評価した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 鋼管に沿って錘を落下させる衝撃加力試験により、計算に対応する落下速度が得られるとともに、その荷重も安定した結果を示した。
- (2) パイプ式 TB 胴のひずみを換算することで、試験体に作用する荷重の評価が可能である。
- (3) 衝撃荷重によりブレースの鋼材が降伏する程度の力が生じた場合でも、筆者らが提案する複合材料ブレースに損傷や破断は生じない。

謝辞

本研究の実施には、福井ファイバーテック 中島浩二氏、元豊橋技術科学大学大学院 山本梨乃氏の協力を得た。本研究の一部は令和二年 国土交通省 建設技術開発助成制度の補助を頂いた。高速度カメラは、豊橋技術科学大学 教育研究基盤センター 貸出機器室の共同利用機器を利用した。ここに記して謝意を示します。

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) Tamai H., Takamatsu T., Matsuo A.: Improvement of aseismic performance on Non-compression brace, Journal of Structure and Constrict Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 70, No. 595, pp. 131-138, 2005. (in Japanese)
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.
- 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) JIS A 5541 (2008): 建築用ターンバックル胴
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 古川忠稔, 田口孝: 木造住宅の耐震性と新しい耐震補強工法の一例, 全建ジャーナル, 第 48 巻第 10 号, pp. 5-14, 2009.

[2024 年 6 月 4 日原稿受理 2024 年 9 月 25 日採用決定]