

# 実大折返しブレースの終局状態に関する研究 (その1 ブレース全体の変形性能に関する検討)

## Study on the Ultimate Condition of the Full-Scale Folded-Brace Part1 Study on Deformation Performance of the Entire Brace

○菊地謙太<sup>1</sup>, 波田雅也<sup>2</sup>, 北澤龍太郎<sup>3</sup>, 竹内健一<sup>2</sup>, 村井克綺<sup>2</sup>, 北嶋圭二<sup>4</sup>, 中西三和<sup>4</sup>, 安達洋<sup>5</sup>

\* Kenta Kikuchi<sup>1</sup>, Masaya Hada<sup>2</sup>, Ryutarou Kitazawa<sup>3</sup>, Kenichi Takeuchi<sup>2</sup>, Katsuki Murai<sup>2</sup>, Keiji Kitajima<sup>4</sup>, Mitsukazu Nakanishi<sup>4</sup>, Hiromi Adachi<sup>5</sup>

Abstract: In this study, the deformation performance was examined for the full-scale folded brace used in previous experiments. In this paper, we examined the deformation performance of the entire folded brace.

### 1. はじめに

折返しブレースは、径の異なる3本の鋼材(芯材, 中鋼管, 外鋼管)を一筆書きの要領で折り返し接合し, 部材長さを2.5倍程度に長くしたブレース材である(Fig.1)<sup>[1]</sup>. 軸降伏変位が増大することで, 層間変形角  $R=1/200\text{rad}$  程度まで降伏しない(Fig.2). さらに, 芯材(圧縮材)の横たわみを中鋼管(引張材)が拘束することで全体座屈が生じず, 引張耐力と同等の圧縮耐力を発揮するため, 部材種別BAの耐震ブレースとして評定を取得している(Fig.3). これらの特長は, 既往の研究により実験的および理論的に明確となっている<sup>[2]</sup>. また, これまで実施した実大規模の構造実験より, 折返しブレースは, 座屈拘束効果により全体座屈が生じないため, 最終的な変形性能の限界は芯材の局部座屈(板要素の座屈)で決定することが報告されている<sup>[2][5]</sup>.

本研究では, 正負交番に繰り返し軸変形を受ける折返しブレースの変形性能を評価する指標として塑性率 $\mu$ と平均累積塑性変形倍率<sup>[6]</sup>に着目し, 既往の研究<sup>[2][5]</sup>で得られた実大実験結果の変形性能について検討する. 本報(その1)では, 折返しブレース全体の変形性能について示す.

### 2. 実大実験の概要と結果

2.1 実験概要 検討対象の試験体諸元を Table1 に, 载荷スケジュールを Table2 に示す. 検討対象は, 実大の折返しブレース計8体である. いずれも降伏軸力  $N_y$  が芯材断面で決定し, 軸降伏変位  $\delta_y$  が芯材単体の在来ブレースに比べて1.9~2.6倍に増大するように設計されている.

また, 芯材の断面形状はH形鋼(4体), 角形鋼管(1体), 円形鋼管(3体)と様々で, 部材長さ, 载荷スケジュールも各々異なっている. ただし, 実験方法は共通であり, 架構に組込まれたブレースの応力状態を再現するため, Fig.4のように部材を斜めに設置した状態で, 折返しブレース全体の軸降伏変位  $\delta_y$ (塑性率  $\mu=1.0$ )を基準とした変位制御で正負交番に载荷している.

2.2 折返しブレース全体の履歴曲線 折返しブレース全体の軸力  $N$ -軸変位  $\delta$  関係(履歴曲線)を Fig.5 に示す. 図中には, 参考値として Table1 に示した折返しブ

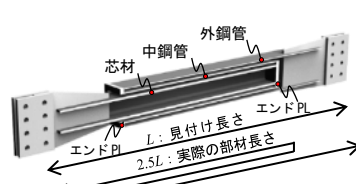


Fig.1 Folded Brace (perth)

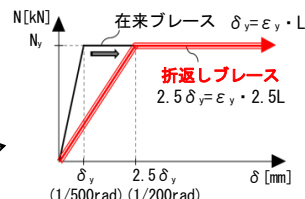


Fig.2 Axial Force-Axial Disp.

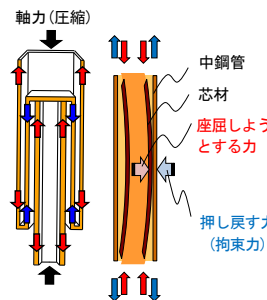


Fig.3 Buckling Restriction Effect

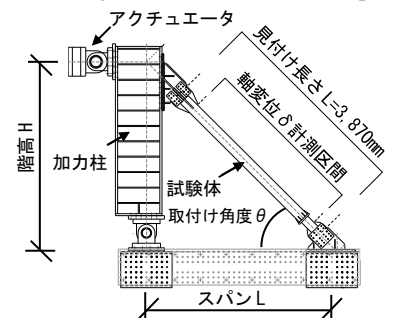


Fig.4 Loading Device (No.1)

Table1 Specimen Specifications

| 試験体 No | 各鋼材(芯材, 中鋼管, 外鋼管)の断面特性 |   |          |          |                       |           | 折返しブレース全体の計算値                    |                   |               |          |            |               |                     |          |          |      |
|--------|------------------------|---|----------|----------|-----------------------|-----------|----------------------------------|-------------------|---------------|----------|------------|---------------|---------------------|----------|----------|------|
|        | 鋼材名                    | 断面形状<br>H-b x d x t <sub>w</sub> x t <sub>f</sub><br>□-b x d x t <sub>w</sub> x t <sub>f</sub><br>○-b x t | 鋼種       | 細長比<br>λ | 芯材幅厚比<br>(径厚比)<br>b/t | 基準強度<br>F | 降伏応力 $\sigma_y$<br>(0.2%オフセット耐力) |                   | 降伏軸力<br>$N_y$ | 軸剛性<br>K | 見付け長さ<br>L | 降伏軸力<br>$N_y$ | 軸降伏変位<br>$\delta_y$ | 軸剛性<br>K | 軸降伏変位増大率 | 参考文献 |
|        |                        |   |          |          |                       |           | N/mm <sup>2</sup>                | N/mm <sup>2</sup> |               |          |            |               |                     |          |          |      |
| 1      | 芯材                     | H-175 x 175 x 11.0 x 7.5  | SN400B   | 89       | 8.0                   | 235       | 308                              | 335               | 1,583         | 339      | 3,870      | 1,583         | 12.7                | 125      | 2.6      | 2)   |
|        | 中鋼管                    | □-197 x 191 x 6.0 x 9.0   | SM490A   | 54       | 21.2                  | 325       | 398                              | 2,223             | 382           |          |            |               |                     |          |          |      |
|        | 外鋼管                    | □-213 x 213 x 9.0 x 6.0   |          | 48       | 23.7                  | 325       | 398                              | 2,457             | 407           |          |            |               |                     |          |          |      |
| 2      | 芯材                     | H-125 x 125 x 9.0 x 6.5   | SN400B   | 108      | 6.9                   | 235       | 278                              | 278               | 828           | 215      | 3,373      | 828           | 9.1                 | 91       | 2.3      | 2)   |
|        | 中鋼管                    | □-150 x 150 x 9.0   | BCR295   | 60       | 16.7                  | 295       | 416                              | 1,996             | 359           |          |            |               |                     |          |          |      |
|        | 外鋼管                    | □-175 x 175 x 6.0   |          | 49       | 29.2                  | 295       | 348                              | 1,368             | 284           |          |            |               |                     |          |          |      |
| 3-1,2  | 芯材                     | H-150 x 150 x 10.0 x 7.0  | SN400B   | 260      | 7.5                   | 235       | 300                              | 306               | 1,183         | 90       | 9,800      | 1,183         | 28.4                | 42       | 2.1      | 3)   |
|        | 中鋼管                    | □-175 x 175 x 9.0   | BCR295   | 147      | 19.4                  | 295       | 398                              | 2,267             | 132           |          |            |               |                     |          |          |      |
|        | 外鋼管                    | □-250 x 250 x 6.0   |          | 101      | 41.7                  | 295       | 377                              | 3,165             | 190           |          |            |               |                     |          |          |      |
| 4      | 芯材                     | □-150 x 150 x 6.0   | BCR295   | 168      | 25.0                  | 295       | 413                              | 1,377             | 76            | 9,800    | 1,377      | 35.8          | 38                  | 1.9      | 4)       |      |
|        | 中鋼管                    | □-175 x 175 x 9.0   | BCR295   | 147      | 19.4                  | 295       | 391                              | 2,229             | 132           |          |            |               |                     |          |          |      |
|        | 外鋼管                    | □-250 x 250 x 9.0   |          | 101      | 27.8                  | 295       | 359                              | 3,012             | 191           |          |            |               |                     |          |          |      |
| 5-1~3  | 芯材                     | ○-190.7 x 5.3   | STKN490B | 92       | (36.1)                | 325       | 476                              | 1,471             | 121           | 6,001    | 1,471      | 24.7          | 60                  | 2.0      | 5)       |      |
|        | 中鋼管                    | ○-216.3 x 8.2   | STK490   | 82       | (26.4)                | 325       | 471                              | 2,527             | 215           |          |            |               |                     |          |          |      |
|        | 外鋼管                    | ○-244.5 x 9.0   | SM490A   | 72       | (27.2)                | 325       | 394                              | 2,624             | 260           |          |            |               |                     |          |          |      |

Table2 Loading Schedule

| 試験体No<br>(断面形状) | 载荷スケジュール   |      |
|-----------------|--|------|
|                 | 共通事項   | 参考文献 |
| No.1 (H)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>部材を斜めに設置した状態で载荷</li> <li>正負交番载荷</li> <li>実験値の塑性率 <math>\mu=1.0</math> を基準とした変位制御</li> </ul>   |      |
| No.2 (H)        | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0, 1.5, 2.0</math> を各2サイクル</li> <li><math>\Rightarrow \mu=2.5</math> を4サイクル <math>\Rightarrow \mu=3.0</math> を14サイクル</li> </ul> |      |
| No.3-1 (H)      | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5</math> を各2サイクル</li> </ul>  |      |
| No.3-2 (H)      | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0, 1.5, 2.0, 3.5</math> を各2サイクル</li> </ul>  |      |
| No.4 (□)        | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0, 1.5, 2.0, 2.5</math> を各2サイクル</li> <li><math>\Rightarrow \mu=3.0</math> を1サイクル</li> </ul>                                     |      |
| No.5-1 (○)      | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0</math> を2サイクル <math>\Rightarrow \mu=2.0</math> を7サイクル</li> <li><math>\Rightarrow</math> 7サイクル目圧縮側で押し切り</li> </ul>             |      |
| No.5-2 (○)      | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0, 1.5, 2.0, 2.5</math> を各2サイクル</li> <li><math>\Rightarrow \mu=3.0</math> を1サイクル</li> </ul>                                     |      |
| No.5-3 (○)      | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\mu=1.0</math> を各2サイクル <math>\Rightarrow \mu=2.5</math> を10サイクル</li> </ul>  |      |

1:日大理工・院(前)・海建 2:青木あすなる建設(株) 3:日大理工・海建 4:日大理工・教員・海建 5:日大・名誉教授

レース全体の計算値を用いた荷重-変位関係を赤線で示し、降伏点( $N_y$ ,  $\delta_y$ )を□印で示している。また、軸変位 $\delta$ から換算した層間変形角  $R=(\delta/\cos\theta)/H$ も併記している。まず、Fig.5(a)の試験体 No.1 より、軸剛性の実験値は計算値(鋼材 3 本の軸剛性を直列につないで算出した値)とほぼ一致し、引張・圧縮とも  $R=1/200\text{rad}$  程度で芯材が軸降伏していることがわかる。その後、 $R=1/50\text{rad}$  程度まで安定した紡錘形の履歴を描き、最終的には芯材局部座屈が発生して耐力低下が生じ、実験を終了している。これら結果は、Fig.5(b)~(h)に示す他の試験体も同様であり、いずれも  $R=1/200\text{rad}$  程度で軸降伏して紡錘形の履歴を描いた後、変形性能の限界が芯材の局部座屈によって決定した。なお、No.2のみ、限界点に至る前に高力ボルト摩擦接合部に滑りが生じたところで実験終了した。

### 3. 折返しブレース全体の变形性能

#### 3.1 最大塑性率 $\mu$ と平均累積塑性変形倍率 $\bar{\eta}$

繰り返し正負交番に軸変形を経験した折返しブレースの变形性能を検討するため、最大耐力の95%低下時を变形性能の限界時<sup>7)</sup>と定義し、Fig.5の履歴曲線上に限界時を●印で、限界時までを経験した圧縮側のピーク変位( $\delta_{\max}$ )時を◆印で示している。以下では、变形性能の指標として、限界時までの最大塑性率  $\mu$  および平均累積塑性変形倍率  $\bar{\eta}$  について検討する。最大塑性率  $\mu$  および平均累積塑性変形倍率  $\bar{\eta}$  の算出方法を Fig.6 に示す。最大塑性率  $\mu$  は、式(1)のようにピーク変位  $\delta_{\max}$  を軸降伏変位  $\delta_y$  で除して算出する。また、平均累積塑性変形倍率  $\bar{\eta}$  は、式(2)のように累積エネルギー吸収量  $W$  (履歴面積)の1/2(正荷重片側に換算)を、降伏軸力  $N_y$  と軸降伏変位  $\delta_y$  で除して無次元化した値とする。

**3.2  $\mu$  と  $\bar{\eta}$  の算出結果** ブレース全体の最大塑性率  $\mu$  と平均累積塑性変形倍率  $\bar{\eta}$  の一覧を Table3 に、 $\mu-1$  と  $\bar{\eta}$  の相関図<sup>6)</sup>を Fig.7 に示す。Fig.7 の凡例は、Table3 中の試験体 No 欄の括弧書きの断面形状と対応している。図表より、ブレース全体の最大塑性率  $\mu$  は 2.2~4.6、累積塑性変形倍率  $\bar{\eta}$  は 10~89 の範囲であった。部材長さや载荷スケジュールが異なるため直接比較できないが、芯材 H 形鋼タイプの  $\mu$  や  $\bar{\eta}$  が大きく、円形鋼管、角形鋼管の順で小さい傾向があった。また、Fig.7 中の右上りの直線は、 $\bar{\eta}$  と  $\mu-1$  を関係づける係数  $n$ <sup>6)</sup>で、 $\mu$  相当の変形での定常ループの繰り返し回数  $n$  の 2 倍の値を表している( $n=2$  で 1 ループ)。各試験体の係数  $n$  は 3~37 の範囲であり、折返しブレース全体では最大塑性率時の振幅で 1.5~18.5 ループ相当の繰り返し変形性能を有していることがわかった。

#### 4. まとめ

本報(その 1)では、既往の実大実験結果を用いて折返しブレース全体の变形性能について検討した。

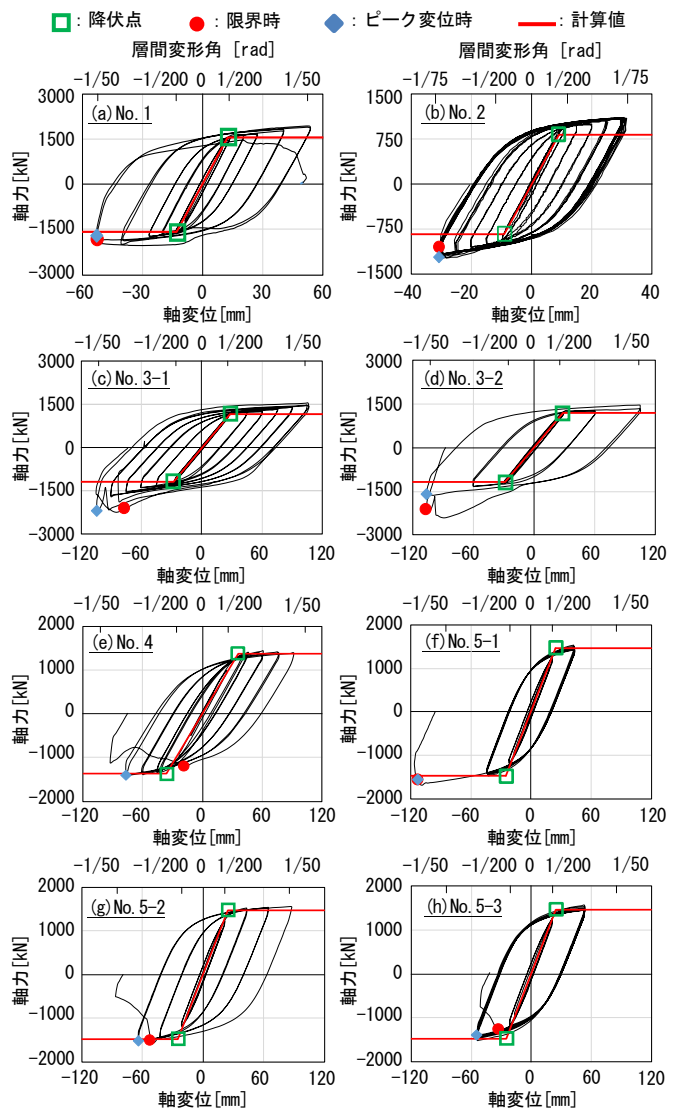


Fig.5 Axial Force-Axial Displacement of the Entire Folded Brace (history curve)

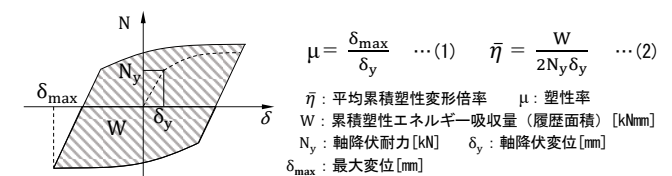


Fig.6 Calculation Method of Maximum Plasticity Ratio  $\mu$  and Average Cumulative Plastic Deformation Ratio  $\bar{\eta}$

Table3 List of Maximum Plasticity Ratio  $\mu$  and Average Cumulative Plastic Deformation Ratio  $\bar{\eta}$

| *試験体No<br>(断面形状) | ピーク変位                 | 最大塑性率 | 累積塑性エネルギー吸収量 | 平均累積塑性変形倍率   |
|------------------|-----------------------|-------|--------------|--------------|
|                  | $\delta_{\max}$<br>mm | $\mu$ | W<br>kN·m    | $\bar{\eta}$ |
| No.1 (H)         | -53                   | 4.2   | 1,087        | 27           |
| No.2 (H)         | -31                   | 3.4   | 1,345        | 89           |
| No.3-1 (H)       | -105                  | 3.7   | 2,551        | 38           |
| No.3-2 (H)       | -106                  | 3.7   | 1,058        | 16           |
| No.4 (□)         | -77                   | 2.2   | 1,019        | 10           |
| No.5-1 (○)       | -113                  | 4.6   | 828          | 11           |
| No.5-2 (○)       | -64                   | 2.6   | 876          | 12           |
| No.5-3 (○)       | -54                   | 2.2   | 1,486        | 21           |

\*括弧内の断面形状は Fig.7 の凡例と対応

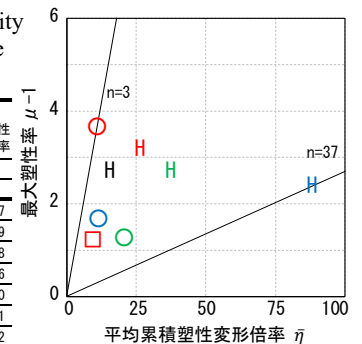


Fig.7 Correlation Diagram between  $\mu-1$  and  $\bar{\eta}$