

## 折返しブレースの芯材の局部座屈挙動と限界変位に関する実験的研究

### Experimental Study on Local Buckling behavior and limit displacement of the Folded-Brace Core

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

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

Abstract: This paper, we examined the local buckling behavior and the limit displacement, we conducted a loading experiment the H-steel short pillar where assuming local buckling of the folded brace core part occurs.

#### 1. はじめに

折返しブレースは、断面の異なる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, 部材長さを約2.5倍にしたブレース(Fig.1)であり, 軸降伏変位の増大効果と座屈拘束効果(Fig.2)を有する<sup>[1]</sup>。また, 変形性能の限界は局部座屈で決まり, 局部座屈の生じる変形レベルは短柱の単調圧縮荷重実験に基づいて定式化された「局部座屈発生時の推定塑性率  $\mu_{es}$ 」<sup>[2,3]</sup>を用い, ある程度推定可能であると報告されている<sup>[4]</sup>。

本研究では, 視覚的に芯材の局部座屈挙動を把握することと, 推定塑性率  $\mu_{es}$  の特性を確認し, 繰返し荷重時の限界変位を評価することを目的とし荷重実験を行う。

#### 2. 実験概要

**2.1 試験体** 試験体諸元を Table 1 に示す。試験体は, 実大実験荷重中には目視できない局部座屈が生じている芯材部分を想定した。既往の実大実験で用いた広幅 H 形鋼芯材(H-150)を, フランジ幅厚比(b/tr)を一定に約 1/2 に縮尺した溶接組立 H 形鋼断面である。b/tr は, 折返しブレースに用いる芯材(H-100~H-300)の幅厚比 6.3~10.0)の概ね中間値(=7.8)である。試験体長さは全体座屈させないため, せい約 3 倍の短柱とした。また, Table 1 には計算値(降伏軸力  $N_y$ , 降伏変位  $\delta_y$ )と推定値(推定塑性率  $\mu_{es}$  と推定変位  $\delta_{es}$ , 繰返し荷重時の全振幅変位に換算し算定した推定限界振幅  $\delta_u$ )を併記している。 $\delta_{es}$  は  $\delta_y$  に  $\mu_{es}$  を乗じて算定し,  $\delta_u$  は,  $\delta_{es}$  に  $\delta_y$  を加

え換算した全振幅変位に 1/2 を乗じて算定した。

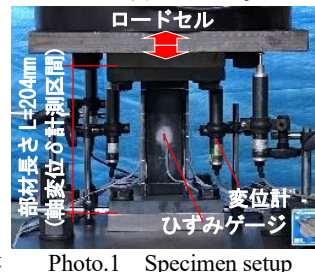
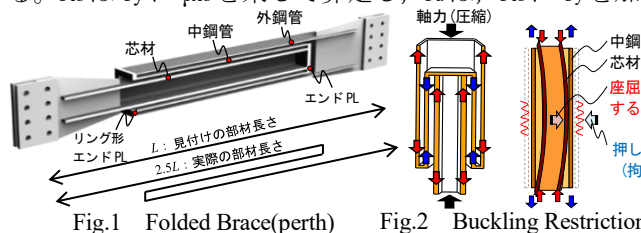
**2.2 実験方法および実験変数** 試験体セットアップ状況を Photo.1 に示す。試験体を疲労試験機に両端固定でセットし, 引張を正として軸方向に加力した。計測項目は, 軸力 N, 軸変位  $\delta$ , 軸ひずみ  $\epsilon$  である。

実験変数を Table 2 に示す。実験変数は荷重パターンで, 単調圧縮荷重(MC)3 体, 漸増荷重(GI)2 体, 一定振幅荷重(C)5 体の計 10 体実施した。漸増荷重は, 片振幅を  $\pm 0.5\text{mm}$  ずつ増分させ, 変数を繰返し回数(2 回, 4 回)とした。一定振幅荷重は, 変数を片振幅( $\pm 1.0\text{mm}$ ,  $\pm 1.5\text{mm}$ ,  $\pm 2.0\text{mm}$ ,  $\pm 2.5\text{mm}$ ,  $\pm 3.0\text{mm}$ )とした。

#### 3. 実験結果

Table 3 に各荷重実験の実験結果を一覧にして示す。

**3.1 単調圧縮荷重** Fig.3 に単調圧縮荷重の軸力-軸変位関係を示す。Fig.3(a)は実験終了までの全体, (b)は局部座屈の発生した領域を拡大して示している。図中には Table 1 の計算値と推定変位  $\delta_{es}$  を併記している。Photo.2 に Fig.3 中①~④の試験体状況を示す。3 体いずれの試験体も  $-0.45\text{mm}$  程度で圧縮軸降伏(①)した。その後,  $-1.0\text{mm}$  を超えたあたりで部材中央に局部座屈の発生が目視観察されたが耐力低下せず徐々に荷重上昇し,  $-4.0\text{mm}$  程度で最大軸力  $N_{max}$ (②)に達した。また, Fig.3(b)より  $N_{max}$  到達時(図中◇)の変位が, 推定変位  $\delta_{es}$ ( $-4.0\text{mm}$ : 図中●)と対応していることが確認できる。その後, 徐々に耐力低下していき



試験体名	荷重パターン
MC-1~3	単調圧縮荷重
GI-1	$\pm 0.5\text{mm}$ 繰返し2回
GI-2	漸増荷重 繰返し4回
C-1	一定振幅荷重
C-2	
C-3	
C-4	
C-5	

Table 1 Specimen Specifications

断面形状 <sup>※1</sup>	材料特性 <sup>※2</sup>		幅厚比	断面積 A[mm <sup>2</sup> ]	試験体長さ L[mm]	計算値 <sup>※4</sup>		推定値 <sup>※5</sup>			
	降伏応力 <sup>※3</sup> $\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ $\sigma_u$ [N/mm <sup>2</sup> ]				降伏軸力 $N_y$ [kN]	降伏変位 $\delta_y$ [mm]	推定塑性率 $\mu_{es}$	推定変位 $\delta_{es}$ [mm]	推定限界変位 $\delta_u$ [mm]	
H×B×t <sub>w</sub> ×t <sub>f</sub>											
68×68×3.1×4.4	ウェブ	299	427	19.1	775.4	204	290	0.37	10.7	4.0	$\pm 2.2$
	フランジ	374	456	7.8							

※1: 断面形状は実測値

※2: 各推定値の算出方法

※3: 降伏応力は引張材料試験より算出

※4: 降伏軸力は 0.2%offset 耐力で算出

※5: フランジの降伏応力で算出

$$\mu_{es} = 0.998\xi^{-2.95} \quad \xi = \sqrt{\left(\frac{H}{2t_f}\right)^2 \frac{\sigma_{yf}}{E} + \left(\frac{B}{t_w}\right)^2 \frac{\sigma_{yw}}{6E}}$$

ξ: 等価幅厚比

$\sigma_{yw}$ : ウェブ降伏応力

$\sigma_{yf}$ : フランジ降伏応力

E: ヤング係数:  $205 \times 10^3 \text{N/mm}^2$

Table 3 Experimental result

試験体名	降伏時		最大軸力時			N <sub>y</sub> まで低下時		局部座屈
	軸力 N <sub>y</sub> [kN]	変位 δ <sub>y</sub> [mm]	軸力 N <sub>max</sub> [kN]	片振幅 δ[mm]	繰返し回数	片振幅 δ <sub>y</sub> [mm]	繰返し回数	
MC-1	-321	-0.46	-334	-4.0	-	-7.9	-	発生
MC-2	-321	-0.46	-341	-4.3	-	-7.5	-	
MC-3	-315	-0.44	-332	-3.6	-	-6.8	-	
GI-1	-325	-0.45	-345	±2.0	1	±2.5	2	発生
GI-2	-326	-0.51	-337	±1.5	3	±2.0	3	
C-1	-324	-0.49	-325	±1.0	1	±1.0	41	なし
C-2	-325	-0.44	-342	±1.5	4	±1.5	14	発生
C-3	-316	-0.40	-340	±2.0	2	±2.0	5	発生
C-4	-322	-0.48	-346	±2.5	2	±2.5	4	発生
C-5	-320	-0.43	-346	±3.0	2	±3.0	3	発生

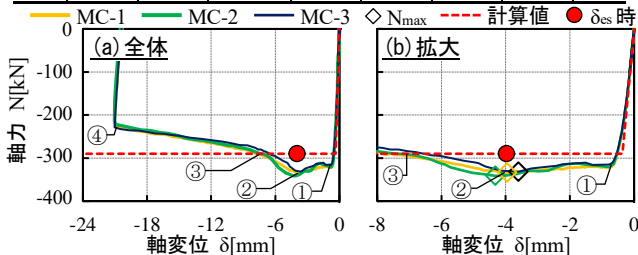


Fig.3 Axial force-Axial displacement relationship of MC

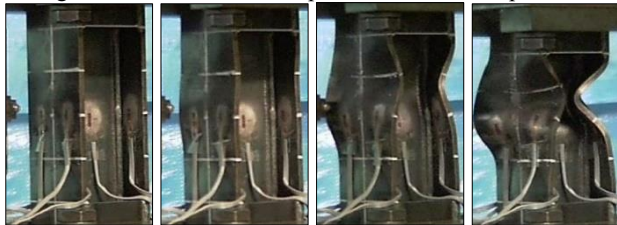


Photo.2 Experimental Situation of MC (MC-1)

軸変位が 7.0mm 程度で降伏軸力 N<sub>y</sub> まで耐力低下(③)し、耐力が N<sub>max</sub> の 2/3 となった時点(④)で荷重を終了した。

**3.2 漸増荷重** Fig.4 に漸増荷重の軸力-軸変位関係を示す(N<sub>y</sub> まで耐力低下した実験結果)。Fig.4(a)が GI-1(繰返し回数: 2 回), (b)が GI-2(4 回)である。GI-1 は片振幅: ±2.0mm の繰返し 1 回目で N<sub>max</sub> に到達し, ±2.5mm の 2 回目で N<sub>y</sub> まで耐力低下した。GI-2 は±1.5mm の 3 回目で N<sub>max</sub> に到達し, ±2.0mm の 3 回目で N<sub>y</sub> まで耐力低下した。N<sub>y</sub> まで耐力低下した時(以下, N<sub>y</sub> 低下時)の振幅を限界変位の実験値とすると, Table 1 に示した推定限界変位 δ<sub>u</sub>(±2.2mm)と概ね対応することが確認できる。

しかし, 両試験体を比較すると N<sub>y</sub> 低下時の振幅が若干異なっており, 局部座屈挙動に繰返し回数の影響があることがわかった。

**3.3 一定振幅荷重** Fig.5 に一定振幅荷重の軸力-軸変位関係を示す(N<sub>y</sub> 低下時の実験結果)。C-1(片振幅: ±1.0mm)は局部座屈せずに N<sub>y</sub> まで耐力低下した。C-2~C-5 では局部座屈して N<sub>max</sub> に到達後, N<sub>y</sub> まで耐力低下した。推定限界変位 δ<sub>u</sub>(±2.2mm)より振幅が小さい C-2(±1.5mm)でも局部座屈後に N<sub>y</sub> まで耐力低下したが, N<sub>y</sub> 低下時の繰返し回数は 14 回と, C-3~C-5(5,4,3 回)より非常に多い回数であった。

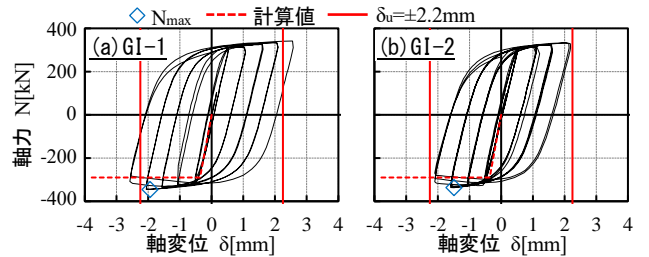


Fig.4 Axial force-Axial displacement relationship of GI

4. 限界変位と繰返し回数の関係

Fig.6 に一定振幅荷重で局部座屈が生じた 4 体の試験体 (C-2~C-5) の N<sub>y</sub> 低下時のひずみ振幅 γ と繰返し回数 N の両軸対数グラフを示す。図中には 4 体の γ-N 関係を回帰した疲労曲線を併記している。疲労曲線は, 4 体の結果と非常に相関性が高いことがわかる。Table 4 に漸増荷重 2 体の N<sub>y</sub> 低下時の最大ひずみ振幅と等価繰返し回数を示す。等価繰返し回数は(1)式で算定した平均累積塑性変形倍率 η̄を用いて, (2)式から算定した。Fig.6 に値をプロットすると一定振幅荷重の疲労曲線に対応した。これより, 同振幅での繰返し回数の異なる漸増荷重であっても最大ひずみ振幅と等価繰返し回数を用いることで, 一定振幅荷重の疲労曲線で概ね評価できることがわかった。

5. まとめ

以上より, 折返しブレースの芯材の局部座屈挙動の視覚的な確認と限界変位の評価を行った。限界変位には, 繰返し回数の影響があり, 一定振幅荷重では実験結果と疲労曲線の相関性が非常に高い。また, 漸増荷重は最大ひずみ振幅と等価繰返し回数を用いることで疲労曲線に対応し, 概ね評価できることがわかった。

【参考文献】

- 波田, 北嶋ほか: 折返しブレースの構造特性に関する実験的研究(その1~7), AIJ大会, pp.747-750, 2012.7, pp.1287-1292, 2013.7, pp.1052-1053, 2014.7, pp.1077-1078, 2015.7
- 建築研究所: 鋼構造物へのエネルギー法活用マニュアル, 2008.9
- 上遠野, 秋山, 松井, 井上ほか: 局部座屈の耐力上昇率, 塑性率に及ぼす鋼材降伏比の影響に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.40B, p673-682, 1994
- 波田, 北嶋ほか: 折返しブレースの変形性能に関する研究(その1~2), AIJ大会, pp.975-978, 2019

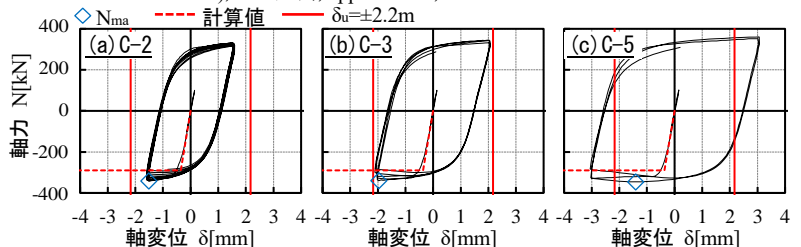


Fig.5 Axial force-Axial displacement relationship of Constant amplitude

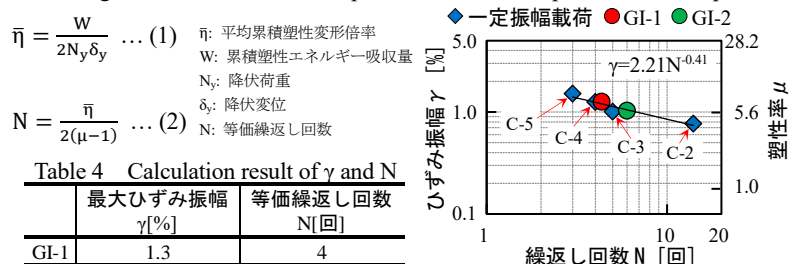


Fig.6 Correlation diagram of γ and N

Table 4 Calculation result of γ and N

	最大ひずみ振幅 γ[%]	等価繰返し回数 N[回]
GI-1	1.3	4
GI-2	1.0	6