

# 繰返し載荷を受ける鋼材ブレースの局部座屈と座屈後耐力

## Local Buckling and Post-Buckling Strength of Steel Braces Subjected to Cyclic Loading

建築都市空間デザイン専攻 空間防災講座 建築構造工学研究室 阿部祥大

### Abstract

In this study, structural tests and FE analysis were conducted to verify the influence of the combination of cross-sectional shape, slenderness ratio, and width-to-thickness ratio on local buckling behavior of steel braces. Even for stubby braces, the brace with a large width-to-thickness ratio subjected to cyclic loading showed a significant local-buckling induced strength deterioration which led to small plastic deformation capacity. FE models reproduced the buckling behavior of the brace, and the generality of the test results was confirmed. And the combination of parameters that determine the strength of the braces was visually presented.

**Keywords:** braces, seismic performance, cyclic loading test, finite element analysis, buckling, width-to-thickness ratio

### 1. はじめに

細長比が小さい鋼材ブレースは、建築基準法で推奨されているが、実験例が国内外で多くない<sup>1)</sup>。この問題点に注目した定永ら<sup>2)</sup>の実験で、有効細長比が20と小さくとも幅厚比が大きい鋼材ブレースは、局部座屈を早期に生じ、層変形角1/100相当で耐力を喪失し、塑性変形能力が極めて乏しいことが確認された。本研究は、さらに構造実験を実施し、有限要素解析と併せて、鋼材ブレースの断面形状、細長比、幅厚比の組み合わせが、その局部座屈や座屈後耐力に及ぼす影響を検証した。

### 2. 実験計画

図1に示す実験装置で、鋼材ブレース試験体の繰返し載荷実験を実施した。仰角45°で試験体を設置し、水平方向に繰返し荷重を与えた。

表1に試験体諸元を示す。表中の\*印はIbrahim<sup>3)</sup>と定永<sup>2)</sup>が実施した試験体である。断面形状(H形、中空円形と中空角形)、断面の幅厚比・径厚比、有効細長比(15.3から86.9)、材端接合形式(固定度が大と小)の4つをパラメータに、計25体の試験体を製作した。鋼材種は、H形がSS400、中空円形がSTK400、中空角形がSTKR400であった。単調引張試験で得た降伏強度 $\sigma_y$ を、表中に示す。 $\sigma_y$ は、H形でF値の1.28倍、中空円形で1.50倍、中空角形で1.59倍であった。材端接合方式は、エンドプレートにブレース材を突合せ溶接した両端固定形式、もしくは、ガセットプレート(GPL)にブレース材を割込み溶接した形式とした。前者はエンドプレートを、後者は柱と梁を模擬した固定治具を介して、載荷治具に接合した。細長比 $KL/i$

の根拠とした座屈長さ係数 $K$ を、両端固定の場合、「鋼構造許容応力度設計規準<sup>4)</sup>」の推奨値0.65をとり、GPLの場合、文献5)と同じく1とした。ロードセルで得たジャッキ荷重に基づいて軸力 $N$ を算出し、ゲージ区間に取り付けたシリンダー型変

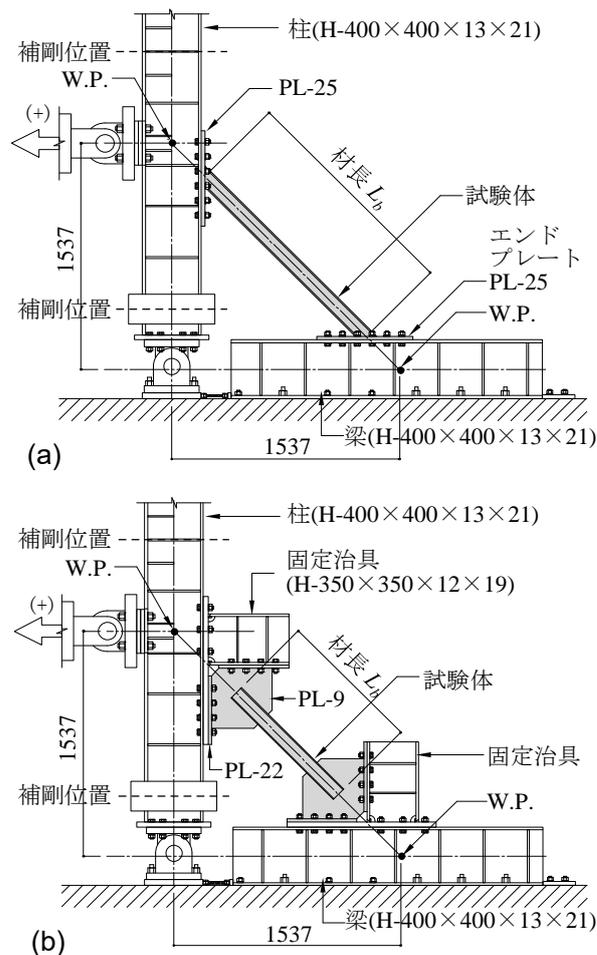


図1 試験装置：(a) 固定型；(b) GPL型

位計によって軸変形を計測した。加力は、軸変形  $\Delta$  をゲージ長  $L$  で除した等価軸ひずみで制御し、正負交番漸増振幅の载荷履歴を採用した。

### 3. 実験結果

図2に、角形鋼管ブレースに見られた局部座屈挙動の典型例を示す。図2(a)に示す試験体15は、顕著な全体座屈を生じる前に局部座屈が全体座屈に先行した。この試験体を含めて、「鋼構造限界状態設計指針・同解説<sup>6)</sup>」(以下LSD<sup>6)</sup>)が規定する柱の幅厚比区分 P-I-1 を満たさない角形鋼管ブレース4、5、10、14、19と20は、同じ挙動を呈した<sup>2)</sup>。図2(b)に示す試験体27を含めて、その他の試験体は、局部座屈より全体座屈が先行した。図3に、同じ試験体15と27の荷重変形関係を示す。図中の  $\sigma_{cr}$  は、LSD<sup>6)</sup>が定める曲げ座屈限界耐力を表す。試験体15は、局部座屈を生じたあと、急激に耐力を喪失した。層変形角を等価軸ひずみと同等と見積もると、層変形角 1/100 で亀裂を生じた。

図4に、全試験体で得た、最大引張・圧縮耐力と細長比  $KL/i$  の関係を整理する。全試験体で、引張降伏を確認しており、引張耐力は引張降伏耐力  $N_y$  の 0.94 から 1.07 倍に達した。圧縮耐力は、実線で示す曲げ座屈限界耐力<sup>7)</sup>  $\sigma_{cr}$  の 0.78 から 1.47 倍であった。局部座屈が先行した中空角形の試験体4、14、19と20は、 $\sigma_{cr}$  の 0.78 倍から 0.88 倍

表1 試験体諸元

ID	断面	細長比 $KL/i$	幅厚比 $b/t, D/t$	接合部	$\sigma_y$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{min}$ [kN]
1*	H-100×100×6×8	30.4	6.3	固定	279	565
11*	H-100×100×6×8	40.1	6.5	固定	324	708
21	H-100×100×6×8	82.6	6.2	固定	324	627
16	H-100×100×6×8	39.3	6.2	GPL	324	673
17	H-100×100×6×8	44.7	6.4	GPL	324	651
7*	H-100×100×6×8	86.9	6.3	GPL	279	413
2*	○-139.8×3.5	15.7	39.9	固定	367	512
12*	○-139.8×3.5	20.9	39.9	固定	353	509
9*	○-139.8×3.5	42.4	39.9	固定	367	424
3*	○-139.8×4.5	15.8	31.1	固定	347	641
13	○-139.8×4.5	20.9	31.1	固定	347	617
6*	○-139.8×3.5	20.3	39.9	GPL	367	524
18*	○-139.8×3.5	23.1	39.9	GPL	353	552
22*	○-139.8×3.5	53.4	39.9	GPL	353	402
23*	○-139.8×3.5	56.9	40.6	GPL	353	411
27	□-100×100×9	27.1	7.1	固定	452	1370
4*	□-125×125×3.2	15.3	35.1	固定	366	463
14*	□-125×125×3.2	20.3	35.1	固定	342	437
10*	□-125×125×3.2	41.3	35.1	固定	366	476
5*	□-125×125×4.5	15.5	23.8	固定	372	777
15	□-125×125×4.5	20.3	23.8	固定	395	774
19*	□-125×125×3.2	19.9	35.1	GPL	342	394
20*	□-125×125×3.2	22.4	35.1	GPL	342	385
24	□-125×125×3.2	51.9	35.9	GPL	354	425
25	□-125×125×3.2	55.2	35.2	GPL	337	446

で、LSDが指標とする誤差範囲±10%を外れた。

図5に、断面の屈服変形が発生するまでの累積等価軸ひずみと、細長比  $KL/i$  の関係を整理する。細長比と明確な相関が見られなかったが、LSD<sup>6)</sup>の幅厚比区分を満たさない角形鋼管は累積等価軸ひずみが小さい傾向があった。

### 4. 短柱圧縮試験

断面形状や幅厚比が局部座屈に及ぼす影響を検証する目的で、短柱圧縮試験<sup>7)</sup>を行った。ブレースと同材料の短柱試験体を、断面幅の3倍の長さで2体ずつ用意した。4台の変位計に基づいて軸方向変形を測定し、4台の測定値が一樣になる

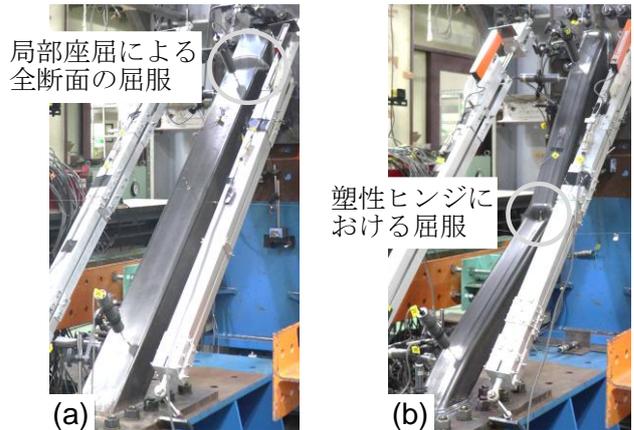


図2 破壊モード：(a) 局部座屈先行；(b) 全体座屈先行

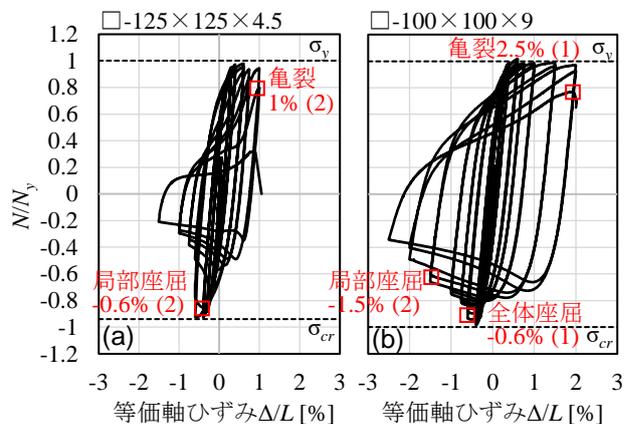


図3 荷重変形関係：(a) 試験体15；(b) 試験体27

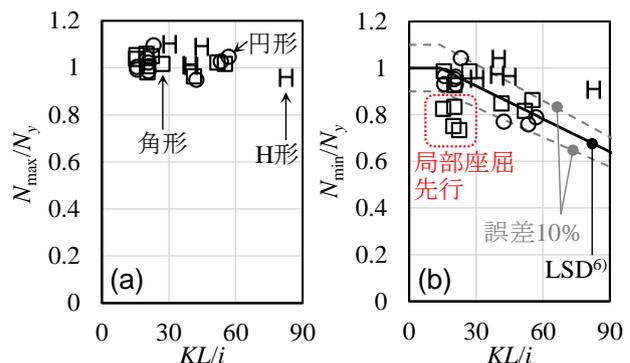


図4 最大耐力：(a) 引張；(b) 圧縮

ように接触面の角度を微調整したのちに载荷した。図6に、円形鋼管2つと角形鋼管3つから得た荷重変形関係を示す。最大耐力を得た軸ひずみは、角形鋼管において、幅厚比37で降伏ひずみの1.5倍、幅厚比25で2.6倍、幅厚比7で13.0倍であり、幅厚比の影響は明らかであった。

### 5. 有限要素法モデルによる再現解析

3章で得たブレースの座屈挙動を汎用有限要素解析プログラム ADINA ver.9.10<sup>8)</sup>で再現することを試みた。局部座屈が先行した角形鋼管の試験体14、15と、全体座屈が先行した試験体27を対象とした。

図7に示すように、エンドプレート間のブレースを4節点アイソパラメトリックシェル要素で構成した。上端では、ブレース断面をブレース軸芯と柱芯の交差点と剛接し、下端では、ブレース断面を固定した。ブレース両端で固定支持されるように境界条件を与えた。実験と同様な履歴となるように、上端の水平変位を制御した。

大変形・大ひずみの構成式を用い、試験体14と15の場合は、線形座屈解析で得た1次モードを、最大変形が断面幅の0.1%になるように増幅させた初期たわみを与えた。材料特性は、von Misesの降伏条件と関連流れ則、バイリニア型の等方硬化則とArmstrong-Frederick移動硬化則を組み合わせた複合硬化則でモデル化した。鋼材の座屈解析では、形状不整が材料不整より大きな影響を及ぼすことが指摘されている<sup>9)</sup>ため、全断面に同じ材料特性を適用し、残留応力を考慮しなかった。図8に示すように、引張試験と、小野ら<sup>10)</sup>が報告した同等級材料の繰返し試験結果と整合するように降伏強度と硬化則のパラメータを定めた。

図9に、試験体14と27の解析から得た荷重-変形関係を、実験で亀裂を生じた時点まで示す。解析は、実験より高い弾性剛性を示したが、実験と同様に、局部座屈あるいは全体座屈が先行する挙動を捉えた。引張耐力の誤差は2.5%以内、圧縮耐力の誤差は3.6%以内で、座屈後の耐力低下も精度良く追跡できており、採用したモデル化方法の妥当性を確認できた。

### 6. 考察

繰返し载荷を経たブレースの耐力を、建築基準法<sup>11)</sup>は最大圧縮耐力の1/3倍、Tremblay<sup>12)</sup>は同0.3倍と提示し、LSD<sup>9)</sup>は、軸ひずみ振幅 $\pm 0.5\%$ の範囲で低減した耐力、座屈後安定耐力を定義している。ここでは、経験した最大引張から折り返したあとの短縮量(図10参照)と、ブレースの座屈後耐力の関係を整理した。図11に、本論文と既往文献

<sup>13)~18)</sup>の実験結果から算定した、短縮量1%と2%における座屈後耐力を、有効細長比と幅厚比の関数として示し、実験値を線形補間した等値線を描画した。図中の黒い四角が本論文の、白い四角が既

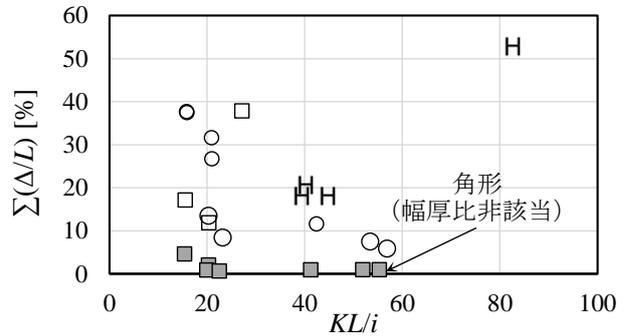


図5 屈服変形までの累積等価軸ひずみ

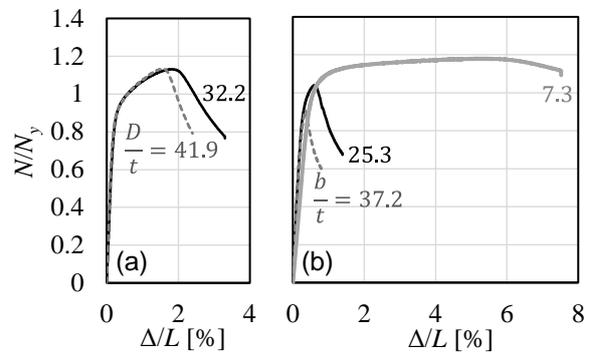


図6 短柱圧縮試験の荷重-変形関係：  
(a) 円形鋼管；(b) 角形鋼管

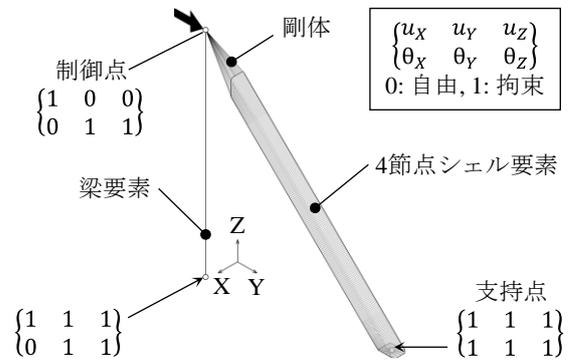


図7 有限要素モデル

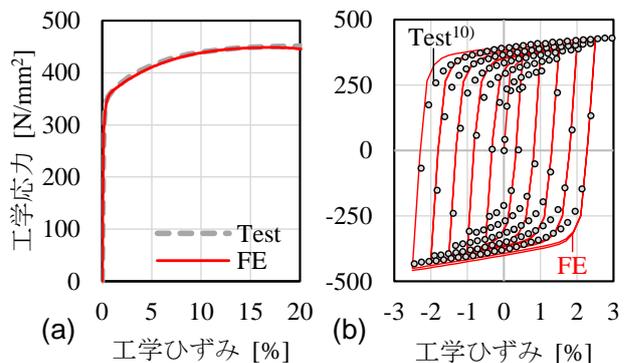


図8 材料モデルの整合性 (試験体14)：  
(a) 単調引張；(b) 一軸繰返し

往文献の実験結果である。幅厚比区分 P-I-1 であれば、有効細長比 60 以下のブレースは、降伏耐力の 0.3 倍以上の座屈後耐力を短縮量 1%まで確保するので、十分に塑性変形能力が高い。幅厚比が 16 以下かつ有効細長比 30 以下のブレースは、短縮量 2%までこの耐力を保持する。このように、図 11 は、有効細長比と幅厚比の関係で、ブレースの塑性変形能力を表現した。

亀裂発生の要因となる局部座屈がどの程度の変形量で生じるか、短柱試験との対比で検討した。図 12 に、ブレースの局部座屈を生じる短縮量を、短柱の最大圧縮耐力時の短縮量で除した比と、細長比の関係を示す。幅厚比が局部座屈を生じる変形量に及ぼす影響を、この比の分母で評価できるとすれば、ブレースの局部座屈を生じる短縮量は、下に凸な放物線状に分布した。細長比 40 付近は BB<sup>11)</sup>相当で、ブレースの変形能力が低くなった。

## 7. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 構造実験により、細長比が小さいブレースでも、幅厚比が大きいと塑性変形能力に乏しいことが分かった。有効細長比 20、幅厚比 24 以上の角形鋼管ブレースは、局部座屈が支配的な破壊モードを示し、層変形角 1/100 で亀裂を生じた。

- 2) 有限要素解析で、材料試験や短柱圧縮試験の結果で吟味した形状初期不整の条件により、ブレースの座屈挙動を精度よく再現できた。
- 3) 層変形角 1%と 2%において、角形鋼管ブレースの有する座屈後耐力を決定づける、有効細長比と幅厚比の組み合わせを、視覚的に把握できる図式を提示した。
- 4) 局部座屈を生じる変形量について、ブレースと短柱圧縮試験の比は、細長比と下に凸な放物線状の関係を示した。

## 参考文献

- 1) Matsui, R. et al.: 10th STESSA, 2022
- 2) 定永ら: 日本建築学会北海道支部研究報告集, 96, 2023
- 3) Ibrahim, R et al.: 日本建築学会北海道支部研究報告集, 95, 2022
- 4) 日本建築学会: 鋼構造許容応力度設計規準, 2019
- 5) Lehman et al.: J. of Struct. Eng., Vol.134, No.6, 890-901, 2008
- 6) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 2010
- 7) Tall, L.: Fritz Laboratory Report, 1961
- 8) Bentley systems: Theory and Modeling Guide, ADINA 9.10, 2023
- 9) 佐藤ら: 日本建築学会構造系論文集, 第723号, 893-903, 2016
- 10) 小野ら: 日本建築学会構造系論文集, 第532号, 177-184, 2000
- 11) 国総研ほか監修: 建築物の構造関係技術基準解説書, 2020
- 12) Tremblay, R: J. of Constructional Steel Research, 58, 2002
- 13) Black, R. G. et al.: Report No. UCB/EERC-80/40, University of California, Berkeley, 1980
- 14) Shaback, B. et al.: Can. J. Civ. Eng., Vol. 30, 745-753, 2003
- 15) Goggins, J. M. et al.: Eng. Struct., Vol. 27, 977-989, 2005
- 16) Fell, B. V., et al.: Report No. 172, Stanford Univ., 2010
- 17) Nip, K.H. et al.: Eng. Struct., Vol. 32, 424-441, 2010
- 18) 高橋ら: 日本建築学会関東支部研究報告集, 469-472, 2016

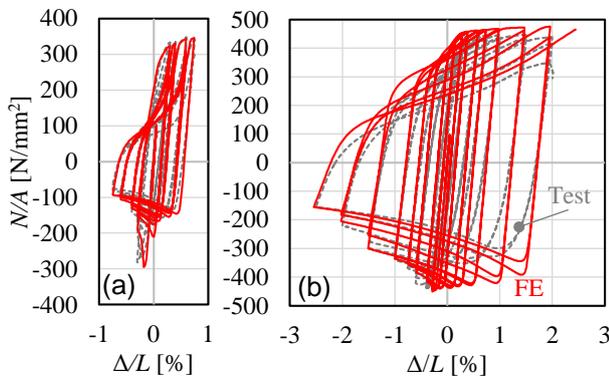


図9 再現解析結果 : (a) 試験体14 ; (b) 試験体27

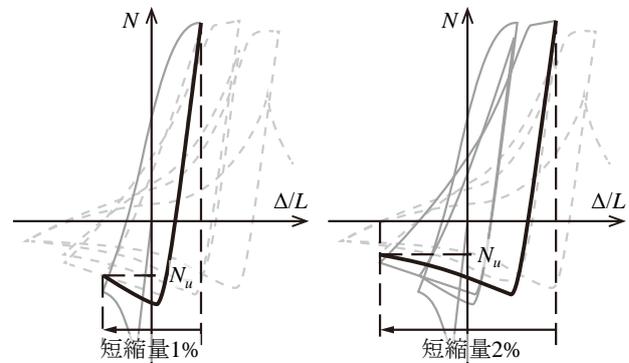


図10 短縮量と座屈後耐力の定義

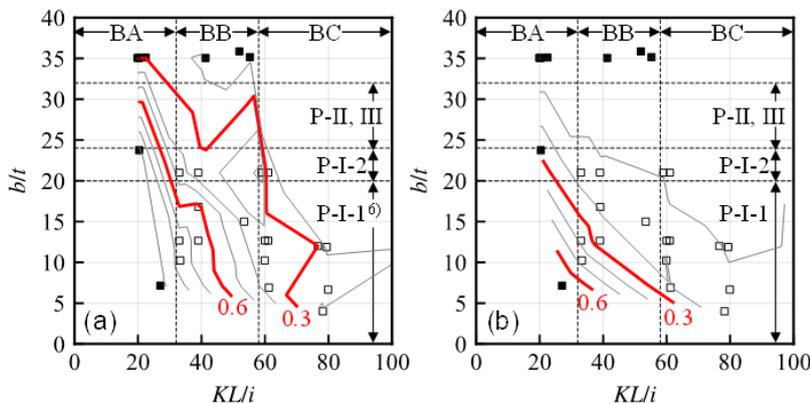


図11 角形鋼管の細長比、幅厚比との関係で表した  $N_u/N_y$  :  
(a) 短縮量1% ; (b) 短縮量2%

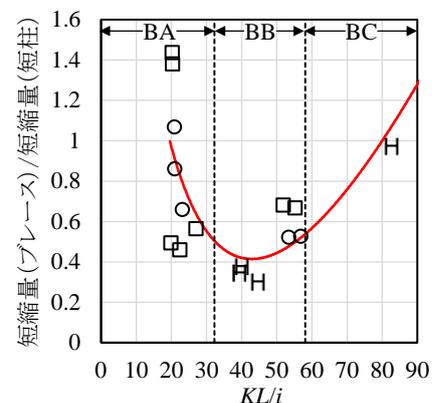


図12 局部座屈発生時のブレース短縮量と細長比の関係