

1. はじめに

鋼構造物に用いられるブレースは、地震動に抵抗する主要な耐震要素である。ブレースの塑性変形性能は、局部座屈で決定される。そこで、局部座屈による耐力劣化過程と、亀裂発生にいたる塑性変形の限界を把握する目的で、一連の試験を実施したので、ここに報告する。

2. 実験計画

角形鋼管 3 つ円形鋼管 3 つの合計 6 つの鋼管に対して、引張試験、短中圧縮試験、短注の引張・圧縮繰返し載荷試験を実施した。図 1 に、それぞれの鋼管の幅厚比または径厚比を、AISC 341-22¹⁾ で規定される変形性能ランクの境界値と併せて示す。角形鋼管の 1 つと円形鋼管の全て Highly ductile に、角形鋼管の 2 つが Moderately Ductile に相当した。

引張試験には、角形鋼管に JIS 12B 号試験片を、円形鋼管に JIS 5B 号試験片を採用した。短注試験と繰返し載荷試験には、図 2 に示す載荷装置を用いた。短柱の全長 L は Tall²⁾ の手法に則り、断面幅または外径の 3 倍とした。短柱の単調載荷は、局部変形による耐力劣化が完了するまで続けた。短柱の繰返し載荷試験では、試験体にエンドプレートに完全溶込み溶接で接合し、そのエンドプレートを治具に高力ボルトで接合した。軸方向変形 Δ を制御して正負交番漸増載荷を与えた。振幅 $\Delta/L = \pm 0.1\%$ のあと、振幅 $\Delta/L = \pm 1\%, \pm 2\%, \pm 3\%, \pm 4\%, \pm 5\%$ を 2 サイクルずつ繰返し、局部座屈を生じた箇所での亀裂に起因した引張耐力の劣化が見られるまで載荷した。

3. 実験結果

表 1 に、引張試験の結果を示す。表中の降伏強度 σ_y は

測定した弾性係数に基づく 0.2% オフセット法で求めた。

図 3 に、短柱の単調圧縮試験で得た荷重と変形の関係を示す。ここに、 N は軸力、 N_y は降伏軸力、 Δ は短縮変形である。角形鋼管は、円形鋼管に比べて早期に局部座屈を生じ、ひずみ硬化による耐力上昇率が小さかった。角形鋼管も円形鋼管も、幅厚比または径厚比が大きいほど耐力上昇率が小さく、より早期に耐力劣化することを確認した。

図 4 に、短柱の繰返し載荷で得た $N/A - \Delta/L$ 関係を示す。引張試験で得た σ_y を併せて示す。試験体は、引張載荷

表 1 引張試験結果

断面	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	伸び [%]
□-75×75×2.3	422 / 418	463 / 461	34.3 / 35.9
□-75×75×3.2	332 / 344	447 / 449	36.8 / 41.0
□-100×100×6	375	430	43.5
○-76.3×3.2	380	445	35.6
○-76.3×4.2	362	428	41.3
○-114.3×3.5	396 / 404	453 / 471	38.5 / 32.0

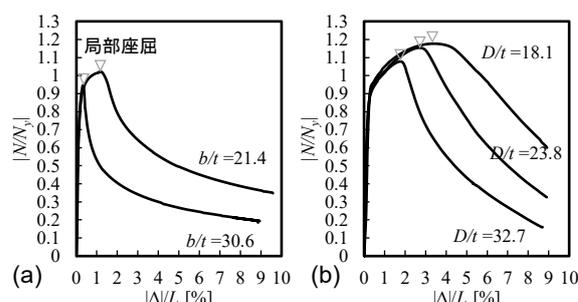


図 3 短柱圧縮試験で得た荷重と変形の関係：(a)角形鋼管；(b)円形鋼管

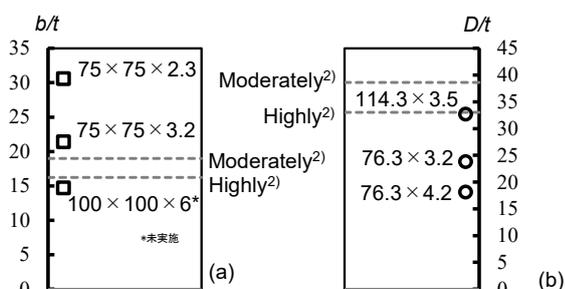


図 1 (a) 角形鋼管の幅厚比、(b)円形鋼管の径厚比

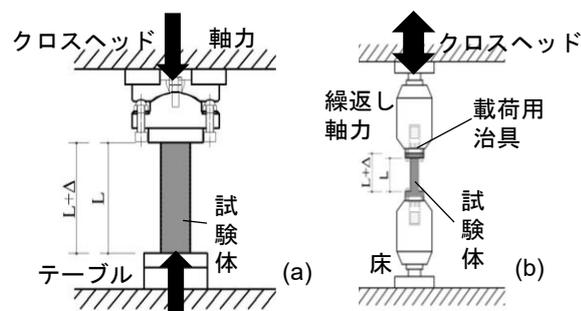


図 2 実験装置：(a) 単調圧縮；(b) 繰返し載荷

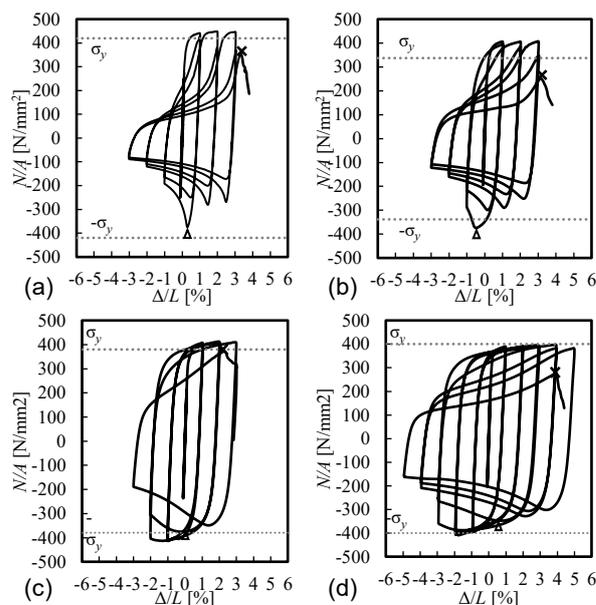


図 4 繰返し載荷試験で得た応力とひずみの関係：(a) $b/t=21.4$; (b) $b/t=30.6$; (c) $D/t=18.1$ (d) $D/t=23.8$

で降伏したあと、圧縮荷重で局部座屈を生じた。荷重振幅が大きくなるにつれて、圧縮側で局部座屈を原因とする耐力劣化が進行し、引張側で局部座屈変形を解消できなくなると、降伏に達しなくなった。耐力の劣化挙動は幅厚比・径厚比が大きいかほど顕著であった。

4. 考察

図5に、 $D/t = 23.8$ を例に、図4の履歴曲線から作成した圧縮側と引張側の骨格曲線を示す。骨格曲線は、以前のサイクルまでに経験した最大の耐力を更新した変形領域を累積した曲線と定義され、最大耐力に達するまでの単調荷重曲線とよく一致することが知られている³⁾。図6に、この方法で作成した骨格曲線に、引張側に引張試験を、圧縮側に短注の単調圧縮試験の結果を重ねて示す。骨格曲線は、引張試験と単調圧縮試験とよく重なった。ただ、骨格曲線が引張側で最大値を記録した伸び量 $\Delta/L = 1.0\%$ から 2.0% は、引張試験で引張強度を記録したひずみ 7% から 19% よりかなり小さかった。この原因は、局部座屈を生じたあと、引張側で局部座屈変形を解消する過程で材料の伸び性能を消費して亀裂を生じたこと、繰返し荷重を経るうちに、局部座屈変形を解消しきれず、引張側で耐力が更新されなくなったことである。骨格曲線が圧縮側で最大値を記録した短縮量 Δ/L は、単調圧縮試験の場合と大差なかった。

(1)と(2)で示す一般化幅厚比 β を導入し、鋼管の塑性変形能力を定量的に比較検証した。

$$\beta = \{(b/t) + 4\} \cdot \sqrt{\varepsilon_y} \quad (1)$$

$$\beta = (D/t) \cdot \varepsilon_y \quad (2)$$

ここに、 ε_y は降伏強度と弾性係数の比である。角形鋼管³⁾と円形鋼管⁴⁾の最大変形の指標 $\varepsilon_c/\varepsilon_y$ を、実験結果で回帰した式(3)と(4)を示す。

$$\varepsilon_c/\varepsilon_y = 5/(\beta^2 - 0.25) \quad (1)$$

$$\varepsilon_c/\varepsilon_y = 0.205 \cdot \beta^{-1.39} \quad (2)$$

ここに、 ε_c は圧縮耐力に達した時点の Δ/L である。図7に、本実験で得られた $\varepsilon_c/\varepsilon_y$ を式(3)と(4)と併せて示す。単調圧縮試験では、 $\varepsilon_c/\varepsilon_y$ は、回帰式と良く対応した。繰返し荷重試験では、 $\varepsilon_c/\varepsilon_y$ は乖離し、円形鋼管では塑性変形能力の劣化が認められる。

表2に短柱の座屈領域の長さを示す。最大耐力以降では局部座屈の発生している領域においてのみ塑性変形が進行し、他の部分は耐力の劣化に伴い除荷されると考えられる。局部座屈の発生しない領域 L_e は弾性のままであるという仮定のもと、試験後の弾性領域を計測することで初期状態における座屈領域の長さ L_b を算出した。

5. まとめ

角形鋼管と円形鋼管の繰返し荷重性能を決定する、局部座屈を把握する目的で、引張試験、短柱試験、短注の引張・圧縮繰返し荷重試験を実施した。文献1)で提示された鋼管ブレースの変形性能の指標を満たす試験体は、繰返し荷重下で振幅 $\pm 2\%$ まで局部座屈を生じず、安定した塑性変形能力を示した。繰返し荷重時の局部座屈を生じる変形は単調圧縮荷重をもととした文献4)と文献5)で提案された式で捉えられないことを確認した。

本研究で計画した実験は、まだ一部未実施であるために、今後も継続する。将来的には、本研究で示した方法で蓄積したデータをもとに、局部座屈による耐力劣化過程も含めて、ブレースの繰返し荷重性能を精度よく捉えられる数値

モデルを開発する。

6. 参考文献

- 1) American Institute of Steel Construction (AISC): Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 341-22, 2022.
- 2) Tall, L.: Stub column test procedure, Fritz laboratory report, Lehigh Univ. 1961.
- 3) 加藤勉ら：日本建築学会論文報告集，第151号，pp.15-20.
- 4) 桑村仁：鋼構造論文集，第1巻3号，pp. 171-185, 1994.
- 5) 越智健之ら：日本建築学会構造系論文報告集，第417号，pp. 53-61, 1990.

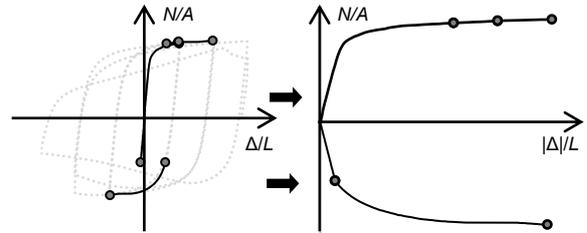


図5 骨格曲線の作成法

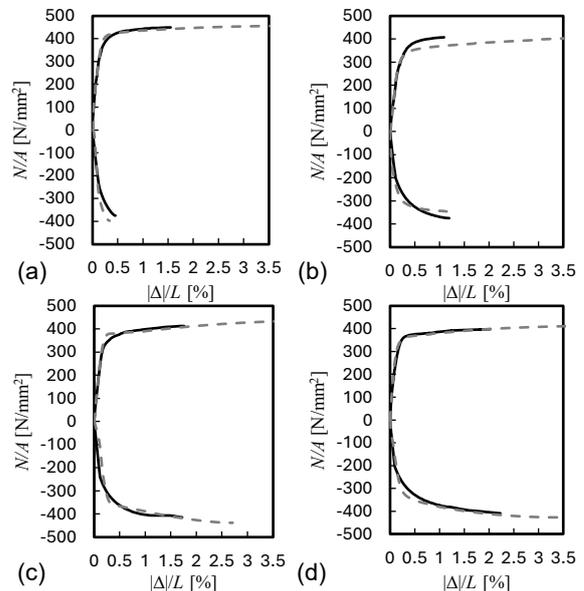


図4 繰返し荷重試験の応力—ひずみ関係

(a) $b/t=21.4$; (b) $b/t=30.6$; (c) $D/t=18.1$ (d) $D/t=23.8$

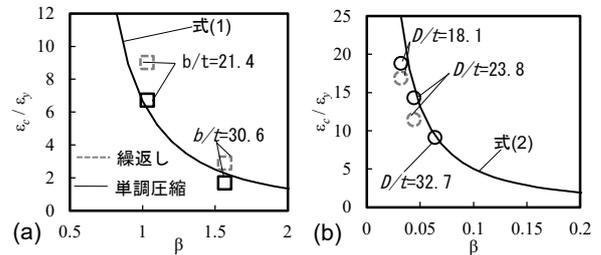
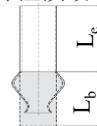


図7 $\varepsilon_c/\varepsilon_y - \beta$ 関係 (a)角形鋼管; (b)円形鋼管

弾性領域



局部座屈領域

図8 座屈領域

表2 短柱の座屈領域

幅厚比 径厚比	L_e	L_b	L_b/B L_b/D
$b/t=21.4$	102	128	1.731
$b/t=30.6$	120	110	1.461
$D/t=18.1$	140	89	1.170
$D/t=23.8$	163	66	0.863
$D/t=32.7$	264	86	0.748