

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14754

研究課題名(和文) 鋼構造柱部材の座屈理論に基づく新規幅厚比尺度の提案と耐力・変形能力の体系的評価

研究課題名(英文) Proposal for the New Normalized Width-Thickness Ratio Based on Buckling Theory and Systematic Evaluation of the Strength and Deformation Capacity of Steel Columns

研究代表者

佐藤 公亮 (Sato, Kosuke)

東北大学・工学研究科・助教

研究者番号：50788510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では鋼構造建築の柱材として多用される角形鋼管や箱形断面の正方形中空断面部材を対象として、局部座屈で決定される最大耐力と塑性変形能力を、弾性局部座屈耐力と全塑性耐力に基づく新規幅厚比尺度SHにより、従来の幅厚比だけでなく辺長比、角部アール、曲げモーメント勾配、二軸曲げ、軸力比、降伏応力度、降伏比に対応した形式で評価している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼構造建築の耐震性能を正確に評価するために、正方形中空断面柱の局部座屈挙動を解明する必要がある。実際に、鋼構造建築の大規模震動実験において正方形中空断面柱に局部座屈が発生して建物全体が崩壊しており、その局部座屈の解明は重要な課題である。本研究では局部座屈で決定される最大耐力と塑性変形能力を従来よりも合理的に評価しており、これは耐震性能の向上に貢献する成果である。

研究成果の概要(英文)：Square hollow section members, such as square steel tubes and box sections, are commonly used as columns in steel buildings. The ultimate strength and plastic deformation capacity determined by local buckling are evaluated as a function of aspect ratio, curvature radius at the corners, gradient of bending moment, angle of applied force, axial force ratio, yield stress, and yield ratio as well as width-thickness ratio using the new normalized width-thickness ratio SH based on the elastic local buckling strength and full plastic strength.

研究分野：建築構造

キーワード：角形鋼管 箱形断面 正方形中空断面 局部座屈 SH 最大耐力 塑性変形能力

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

鋼構造建築物の柱材として角形鋼管部材や箱形断面部材といった正方形中空断面部材が多く使用されている。正方形中空断面柱の大変形挙動は破断を除けば局部座屈により決定されるため、その局部座屈挙動を解明することは重要である。軸圧縮と曲げせん断を受ける柱材の局部座屈は従来の幅厚比だけでなく辺長比や曲げモーメント勾配、二軸曲げ、軸力比の影響も受ける¹⁾。しかし、局部座屈により決定される最大耐力と塑性変形能力はこれらの部材形状と荷重条件に対応した形式で評価されていない。

2. 研究の目的

本研究では、最大耐力と塑性変形能力を部材形状と荷重条件を考慮して体系的に評価することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 部材形状と荷重条件に対応した新規幅厚比尺度 S_H

最大耐力や塑性変形能力を評価するための尺度として、現行の鋼構造設計規準²⁾や鋼構造塑性、限界状態設計指針^{3), 4)}では、純圧縮を受ける場合の検討に基づき、幅厚比が使用されている。しかし、従来の幅厚比では、軸圧縮と曲げせん断を受ける場合の最大耐力と塑性変形能力を部材形状や荷重条件に対応した形式で評価できない。この問題を解決するために、著者は曲げせん断と軸圧縮を受ける場合の弾性局部座屈モーメント M_{cr} ¹⁾と全塑性モーメント M_{pc} に基づいて新規幅厚比尺度 $S_H = (M_{pc}/M_{cr})^{0.5}$ を提案している⁵⁾。

角形鋼管部材は角部曲率半径 R を有するが、 S_H ⁵⁾では R の影響が考慮されていない。そこで本研究では、 S_H の M_{cr} と M_{pc} に及ぼす影響を考慮する。 M_{cr} に及ぼす R の影響を検討するために汎用プログラム Abaqus を使用して有限要素法座屈固有値解析を実施した。図1に解析モデルを示す。図2に $R=0$ の場合で基準化した弾性局部座屈モーメント M_{cr}/M_{cr0} と全幅で基準化した角部外側曲率半径 R/B との関係を示す。幅厚比が小さい場合、 M_{cr} は R の影響により大きくなる。本研究では、図中の近似式により M_{cr} に及ぼす R の影響を考慮する。図3に $R=0$ の場合で基準化した全塑性モーメント M_{pc}/M_{pc0} と R/B との関係を示す。図から、 R/B が大きくなると M_{pc}/M_{pc0} は小さくなる。

(2) 正方形中空断面柱部材の既往実験データベース

S_H による耐力上昇率 M_{max}/M_{pc} と塑性変形倍率 $\theta_{max}/\theta_{pc}-1$ の評価は主に解析結果を対象としており、実験結果を対象とした検討は十分に行われていない⁵⁾。そこで本研究では、正方形中空断面柱の既往実験^{6)~18)}から M_{max}/M_{pc} と $\theta_{max}/\theta_{pc}-1$ のデータベースを作成し、 S_H により評価する。表1に既往実験の条件を示す。全幅 B は100~450 mm、板厚 t は3~24.7 mm、材長 L は485~3300 mmを対象としている。

(3) 正方形中空断面柱部材の有限要素法大変形解析

汎用プログラム Abaqus を使用して大変形解析を実施した⁵⁾。対象は軸圧縮と曲げせん断を受ける片持ち柱である。解析パラメータは幅厚比、せん断スパン比、加力角度、軸力比、材料特性とした。

4. 研究成果

図4に M_{max}/M_p , M_{max}/M_{pc} と S_H との関係を示す。黒プロットが実験結果^{6)~18)}、白プロットが解析結果⁵⁾である。また、点線で既往研究⁵⁾の評価式を示している。図から、 S_H が小さくなると M_{max}/M_p , M_{max}/M_{pc} との関係が線形を失い急増している。また、 S_H が小さい範囲のばらつきは降伏比 Y_R の影響と考えられる。そこで本研究では、耐力上昇率を式(1)により評価する。

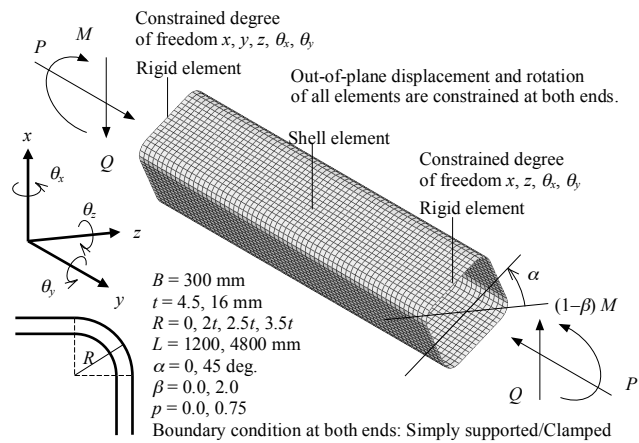


図1 有限要素法解析モデル

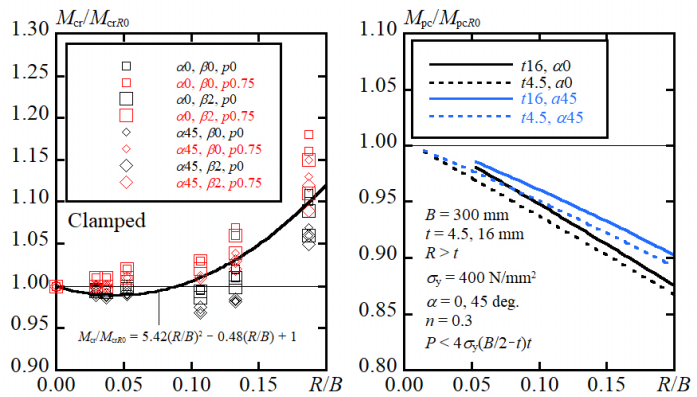


図2 M_{cr} に及ぼす R の影響

図3 M_{pc} に及ぼす R の影響

表 1 正方形中空断面柱部材の既往実験の条件

| 文献番号 | 荷履歴 | 製造方法 | 鋼種 | Y_R (%) | R | B/t | L/B | α (deg.) | β | n |
|------------|---------|---------------------|--------------------------------|------------|-------------------|------------|-----------|-----------------|---------------|--------------------------|
| No. 6 | 単調, 繰返し | 冷間ロール・プレス成形 溶接組立 | BCR295, STKR490, SN490B | 66.5-89.1 | $0, 2.5_t, 3.8_t$ | 25-50 | 6 | 0, 15, 30, 45 | 1.0 | 0 |
| No. 7 | 単調, 繰返し | 冷間ロール・プレス成形 | 記載なし | 69.8-91.4 | 2.0_t | 22.2-93.8 | 5.0, 7.5 | 0 | 1.0 | 0.1, 0.3, 0.45, 0.5, 0.6 |
| No. 8-11 | 単調, 繰返し | 冷間ロール成形 | STKR400 | 83.7-92.9 | $1.7_t-2.5_t$ | 17.3-22.4 | 14.4-26.4 | 0 | 1.0, 1.5, 2.0 | 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 |
| No. 12 | 繰返し | 冷間プレス成形 | SN490B | 68.1-70.6 | 3.5_t | 22.2, 33.3 | 2.4-4.9 | 0, 45 | 1.0 | 0 |
| No. 13, 14 | 単調 | 溶接組立 | 記載なし | 71.9, 79.4 | 0 | 19.4-33.4 | 5.8-9.8 | 0 | 1.0 | 0, 0.25, 0.5 |
| No. 15 | 繰返し | 冷間ロール・プレス成形 溶接組立 | STKR400, STKR490, SM490A | 64.4-86.7 | $0, 2.5_t-3.0_t$ | 18.2-35.4 | 3.3, 3.8 | 0 | 1.0 | 0 |
| No. 16 | 単調, 繰返し | 冷間ロール・プレス成形 溶接組立 | BCR295, SN490B | 63.7-93.8 | $0, 2.5_t, 3.5_t$ | 18.8-33.3 | 5.5 | 0, 45 | 1.0 | 0, 0.25 |
| No. 17 | 単調 | 冷間ロール成形 | C450L0 | 88.6 | 記載なし | 34.5-35.1 | 8 | 0 | 0.0 | 0 |
| No. 18 | 繰返し | 冷間ロール成形 | A500 grade B | 80.0-88.2 | 記載なし | 22.9-35.9 | 7.6 | 0 | 1.0 | 0 |

$$\frac{M_{\max}}{M_{pc}} = \frac{2}{Y_R} (S_H - 0.7)^2 + 1.0$$

$$S_H \geq 0.7 \quad (1)$$

図から、従来の評価式⁵⁾よりも精度よく評価できている。

図5に θ_{\max}/θ_p-1 , $\theta_{\max}/\theta_{pc}-1$ と S_H との関係を示す。図4と同様に、実験結果^{6)~18)}と解析結果⁵⁾および既往研究⁵⁾の評価式を示している。耐力上昇率と同様に S_H が小さい範囲のばらつきは Y_R の影響と考えられる。そこで本研究では、塑性変形倍率を式(2)により評価する。

$$\frac{\theta_{\max}}{\theta_{pc}} - 1 = \frac{40}{Y_R} (1-n) (S_H - 0.7)^2$$

$$S_H \geq 0.7 \quad (2)$$

図から、従来の評価式⁵⁾よりも合理的に評価できている。

正方形中空断面柱の最大耐力と塑性変形能力を角部アールの影響を考慮した弾性局部座屈モーメントと全塑性モーメントに基づく新規幅厚比尺度により幅厚比、辺長比、曲げモーメント勾配、二軸曲げ、軸力比、降伏応力度、降伏比に対応した形式で評価した。

参考文献

- 1) 佐藤光亮, 五十嵐規矩夫: 二軸曲げせん断力と軸力を受ける正方形中空断面部材の連成局部座屈耐力算定, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第706号, pp. 1909-1918, 2014.12
- 2) 日本建築学会: 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-, 2012.5
- 3) 日本建築学会: 鋼構造塑性設計指針, 2017.2
- 4) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 2011.4
- 5) 佐藤光亮: 正方形中空断面柱部材の新規幅厚比尺度による構造性能評価法, 鋼構造年次論文報告集, 第25巻, pp. 233-238, 2017.11
- 6) 佐藤光亮, 五十嵐規矩夫: 曲げせん断力を受ける正方形中空断面部材の局部座屈性状と構造性能評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第731号, pp. 123-133, 2017.1
- 7) 津田恵吾, 松井千秋: 一定軸力下で水平力を受ける角形鋼管柱の耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第512号, pp. 149-156, 1998.10
- 8) 佐藤篤司, 三井和也: 軸方向圧縮力と一端単調曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験

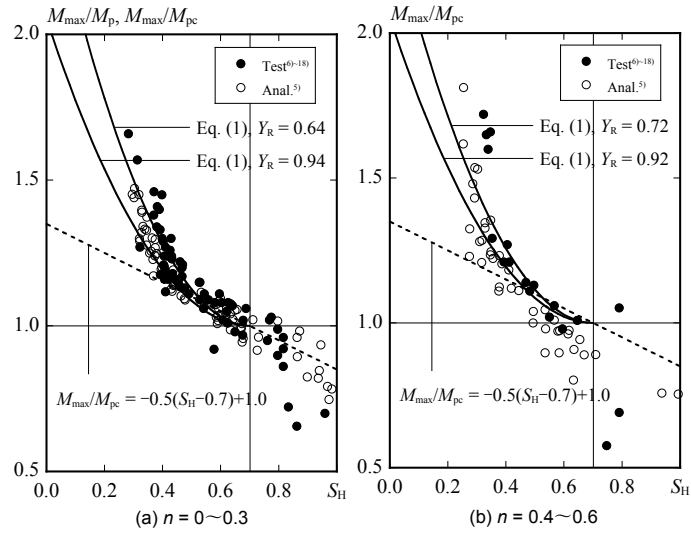


図 4 単調荷重を受ける場合の最大耐力評価

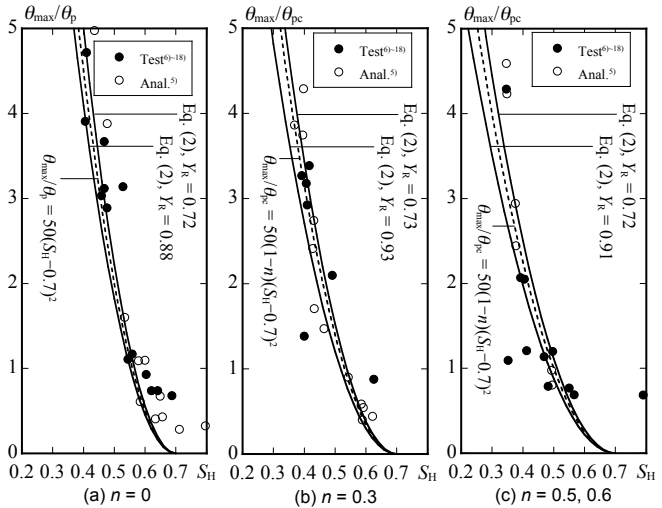


図 5 単調荷重を受ける場合の塑性変形能力評価

- 的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 卷, 第 729 号, pp. 1933–1943, 2016.11
- 9) 佐藤篤司, 三井和也: 軸方向圧縮力と単調逆対称曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 卷, 第 732 号, pp. 267–277, 2017.2
 - 10) 佐藤篤司, 位田健太, 三井和也: 軸方向圧縮力と単調複曲率曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究 材端曲げモーメント比を 0.5 とした場合, 日本建築学会構造系論文集, 第 83 卷, 第 747 号, pp. 739–749, 2018.5
 - 11) 佐藤篤司, 三井和也: 軸方向圧縮力と繰返し一端曲げモーメントを受ける角形鋼管柱の実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 卷, 第 735 号, pp. 701–711, 2017.5
 - 12) 桑田涼平, 聲高裕治, 吹田啓一郎: 局部座屈をともなう冷間プレス成形角形鋼管柱の塑性変形能力, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 卷, 第 718 号, pp. 1961–1970, 2015.12
 - 13) 井上哲郎: 低降伏比高張力鋼箱形断面梁およびビームコラムの終局耐力と変形能力, 構造工学論文集, 第 38 B 卷, pp. 431–441, 1992.3
 - 14) 井上哲郎: 低降伏比高張力鋼箱型断面梁およびビームコラムの荷重-変形性状(降伏棚の有無の効果), 構造工学論文集, 第 39B 卷, pp. 551–560, 1993.3
 - 15) 秋山宏, 桑村仁, 山田哲, 邱榮政, 菊川春三: 角形鋼管の終局挙動に及ぼす製造工程の影響, 構造工学論文集, 第 38B 卷, pp. 399–410, 1992.3
 - 16) 向出静司, 奥伸之, 松尾克也, 多田元英: 製造方法が異なる箱形断面柱の大変形域載荷実験, 鋼構造論文集, 第 23 卷, 第 90 号, pp. 51–64, 2016.6
 - 17) Fadden, M. and McCormick, J.: Cyclic Quasi-Static Testing of Hollow Structural Section Beam Members, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 138, No. 5, pp. 561–570, 2012.5
 - 18) Wilkinson, T. and Hancock, G. J.: Tests to Examine Compact Web Slenderness of Cold-Formed RHS, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, No. 10, pp. 1166–1174, 1998.10

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤公亮 |
| 2. 発表標題 材料特性が異なる正方形中空断面柱部材の最大耐力・塑性変形能力と新規幅厚比尺度 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kosuke Sato |
| 2. 発表標題 Evaluation Method for Ultimate Strength and Plastic Deformation Capacity of Square Hollow Section Columns by New Normalized Width-Thickness Ratio |
| 3. 学会等名 Eighth International Conference on Thin-Walled Structures (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐藤公亮 |
| 2. 発表標題 正方形中空断面柱部材の新規幅厚比尺度による構造性能評価法 |
| 3. 学会等名 鋼構造シンポジウムアカデミーセッション |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐藤公亮 |
| 2. 発表標題 正方形中空断面柱部材の新規幅厚比尺度による最大耐力と塑性変形能力の評価 |
| 3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会 |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|