

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：14101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14865

研究課題名（和文）超薄肉軽量鋼構造部材の局部座屈・ゆがみ座屈耐力と座屈後耐力の評価

研究課題名（英文）Evaluation of Local, Distortional, and Post Buckling Strength of Ultra Thin and Light Steel Members

研究代表者

佐藤 公亮 (Sato, Kosuke)

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50788510

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、板厚が2.3 mm未満と非常に薄い軽量鋼構造の冷間成形角形鋼管とリップ溝形鋼部材を対象として、その大変形挙動を決定する板要素の弾性局部座屈とゆがみ座屈耐力及び座屈後の応力再配分による耐力上昇を伴う最大耐力を理論解析と数値解析及び構造実験によって解明し、従来は十分に考慮されていない荷重条件と部材形状の影響を含めて合理的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで十分に検討されていない薄板軽量形鋼部材の座屈耐力と座屈後耐力に及ぼすせん断曲げ相互作用と板要素連成効果の影響を明らかにし、曲げモーメント勾配と幅厚比と断面及び板要素辺長比に応じた簡便で精度の高い近似式を提案した。現行の構造設計法は板要素の応力状態と境界条件が単純にされた座屈耐力と座屈後耐力に基づいているが、本研究ではより実際に近い現象を扱っており、その成果は今後の座屈設計法の合理化に貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, ultra thin and light cold formed rectangular steel tube and lipped channel steel members with plate thickness of less than 2.3 mm are targeted. The elastic local buckling of plate elements, distortional buckling strength, and ultimate strength with strength increase due to stress redistribution of post buckling which determine the large deformation behavior are investigated by theoretical analysis, numerical analysis, and structural testing. The buckling strength and post buckling strength are reasonably evaluated including the effects of loading conditions and member shapes which have not been sufficiently considered.

研究分野：建築構造

キーワード：薄板軽量形鋼 角形鋼管 リップ溝形鋼 弾性座屈耐力 応力再配分 座屈後最大耐力 せん断曲げ相互作用 板要素連成効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

板厚が 2.3 mm 未満と非常に薄い薄板軽量形鋼がスチールハウス等に使用されている。このような部材は幅厚比が非常に大きいため、降伏耐力に達する前に弾性域における局部座屈やゆがみ座屈によって最大耐力が決定される。したがって薄板部材の耐力評価を行うにあたってまずは局部座屈のメカニズムを解明することが重要である。

現行の薄板軽量形鋼造建築物の許容応力度や有効断面の計算には、簡略化した境界条件や応力状態から算出された座屈係数が用いられている^{1),2)}。また、既往の研究では板要素の連成³⁾やせん断と曲げの相互作用⁴⁾は十分に考慮されていない。

さらに、薄板軽量形鋼造部材に圧縮や曲げが作用すると、局部座屈発生後に応力再配分による耐力上昇が期待できる¹⁾。そのため、薄板軽量形鋼造建築物の設計を行うにあたり座屈後耐力を正確に評価することが重要である。しかし、既往の研究では薄板角形鋼管部材の実験的研究は十分に行われていない^{3),5)}。

2. 研究の目的

本研究の目的は、薄板軽量形鋼の冷間成形角形鋼管を対象として、その大変形挙動を決定する板要素の弾性局部座屈及び座屈後の応力再配分による耐力上昇を伴う最大耐力を理論解析と数値解析及び構造実験によって解明し、従来は十分に考慮されていない荷重条件と部材形状の影響を含めて合理的に評価することである。

3. 研究の方法

3.1 理論解析

せん断曲げを受ける長方形中空断面部材(図1)の板要素連成効果を考慮した弾性局部座屈耐力をエネルギー法による理論解析で導出する⁶⁾。部材形状については、板厚は板幅と比較して小さく全断面で一様であり、初期不整は有していない。境界条件については、部材両端を単純支持または固定支持としている。荷重条件については、せん断と曲げの相互作用を検討し、二軸曲げと圧縮も考慮している。板要素の変位関数については、部材両端を単純支持または固定支持とし、長辺の境界条件は板要素の連成を考慮する。その際、以下の仮定を導入する。これらの仮定を満たすように変位関数を定める。

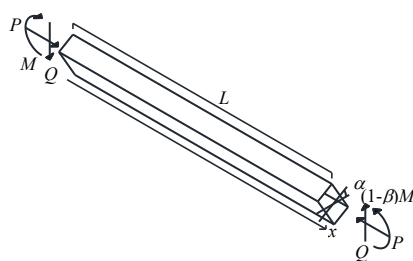


Fig. 1 Analysis model of rectangular hollow section members

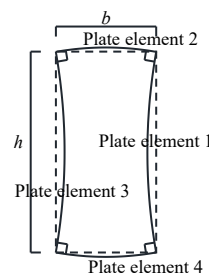


Fig. 2 Coupled effects of plate elements

1. 隣り合う板要素は長辺において座屈変形後も直角を保つ。
2. 板要素に生じる曲げモーメントは長辺において釣り合う(図2)。

3.2 数値解析

せん断曲げを受ける長方形中空断面部材の弾性局部座屈耐力について汎用プログラム Abaqus を用いた有限要素法による数値解析を実施した。解析モデルは 4 節点シェル要素で構成されている(図3)。要素分割については、周方向に長辺の平板を 16 分割し、短辺の平板をシェル要素が正方形に近づくように 4~16 分割している。また、軸方向に平板を辺長比の 16 倍で分割している。境界条件については、部材両端を単純支持または固定支持としている。

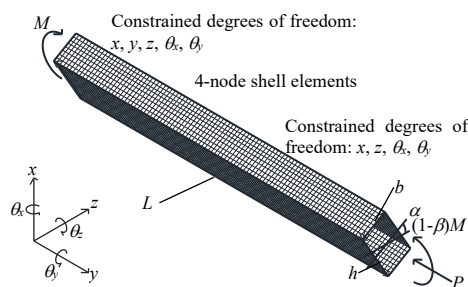


Fig. 3 Finite element model in eigenvalue buckling analysis

また、一端の境界条件を完全固定とし、他端に強制回転角を与えることで純曲げを受ける場合の大変形解析も行う。材料特性は引張試験の結果に基づき、等方硬化則を用いてモデル化している。冷間加工に伴う残留応力については、既往の研究を参考に本研究では無視している⁷⁾。形状初期不整は、最小固有値の座屈モードに基づき最大元たわみをパラメータとして検討する。また、角部曲率半径は考慮していない。

3. 3 構造実験

図4に実験概要を示す。荷重は4点曲げで行っており、20t油圧ジャッキによって荷重を加えている。加力点はロードセル・球座・載荷梁・丸鋼を介して載荷している。図5に試験体と変位及びひずみの計測位置を示す。試験体は2つの軽溝形鋼を圧縮・引張フランジで溶接し、軽角形鋼としている。被試験部の両端にエンドプレートをTIG溶接しており、外側にSTKR400の鋼管を完全溶込み溶接している。表1に本実験で使用する試験体の諸元を示す。試験体名は「断面辺長比 B/H 板厚 t 」としている。図6に引張試験によって得られた応力度-ひずみ度関係を示す。また、表2に鋼材の機械的性質を示す。降伏応力度は0.2%オフセット耐力として求めている。

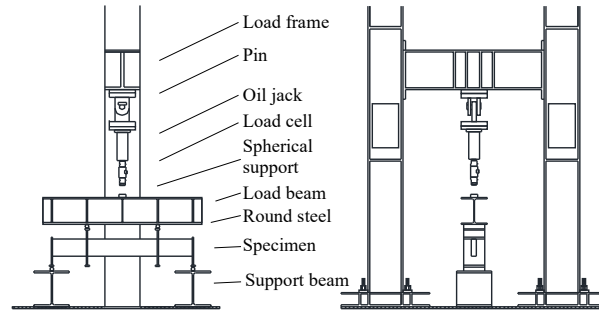


Fig. 4 Test set up

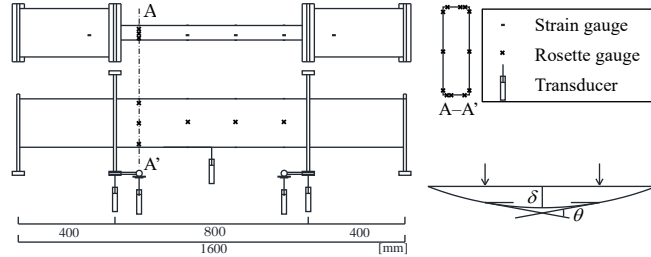


Fig. 5 Specimen and measure position

4. 研究成果

4. 1 せん断曲げを受ける長方形中空断面部材の板要素連成弾性局部座屈耐力の算定

せん断曲げを受ける長方形中空断面部材の板要素連成効果を考慮した弾性局部座屈耐力をエネルギー法による理論解析で導出した。以下に、両端固定支持で荷重条件は加力角度が0度で圧縮が作用していない梁材としての解析結果を示す。

図7に長辺が単純支持、隣接する板要素の回転剛性とねじり剛性を考慮した弾性支持、固定支持の場合および板要素の連成を考慮した場合の座屈係数と辺長比の関係を示す。長辺において板要素の連成を考慮した座屈耐力は単純支持の座屈耐力と固定支持の座屈耐力の間にあることが分かる。

このように、板要素の連成を考慮せずに長辺の境界条件を簡略化すると正確な座屈耐力が得られないといえる。また、エネルギー法による板要素の連成を考慮した座屈耐力は有限要素法による座屈耐力と対応がよく、本研究のエネルギー法による理論解析で得られた座屈耐力は妥当である。

図8にせん断曲げ($\beta \neq 0.0$)を受ける場合のせん断座屈係数と辺長比の関係を示す。図中の点線は、現行の薄板軽量形鋼造建築物の曲げ材ウェブの許容応力度や幅厚比制限値の計算に用いられる、純せん断を受ける四辺単純支持平板の座屈係数5.34である^{1),2)}。図からせん断曲げを受ける場合の座屈耐力は辺長比の大きい範囲で純せん断を受ける場合の座屈耐力を下回る。

図9にせん断曲げ($\beta \neq 0.0$)を受ける場合のフランジ座屈係数と辺長比の関係を示す。図中の点線は、現行の薄板軽量形鋼造建築物の曲げ材フランジの有効断面積や幅厚比制限値の計算に用いられる、純圧縮を受ける四辺単純支持平板の座屈係数4である^{1),2)}。図から、断面辺長比が0.5, 1.0の場合、純圧縮を受ける座屈耐力より大きい。一方、断面辺長比が0.3の場合、純圧縮を受ける座屈耐力より小さい。すなわち、せん断と曲げの相互作用や部材形状の影響を考慮しなければ正確な座屈耐力が得られない。

Table 1 List of specimens

Name	Steel grade	Loading condition	H [mm]	B [mm]	t [mm]	L [mm]
0.3_1.0	SGC400	Pure bending	200	60	1.0	800
1.0_1.0				200		

H: Plate height, B: Plate width, t: Plate thickness, L: Member length

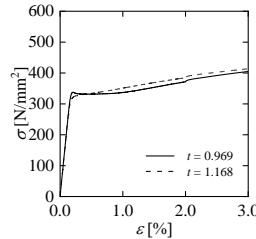


Fig. 6 Stress-strain relationship

Table 2 Material properties from coupon test

t [mm]	E [N/mm ²]	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	E_{long} [%]	Y_R [%]
0.969	2.06×10^5	332	477	34.7	69.6
1.168	2.01×10^5	330	475	36.1	69.5

t: Plate thickness, E: Young's modulus

σ_y : Yield stress, σ_u : Ultimate stress

E_{long} : Elongation, Y_R : Yield ratio

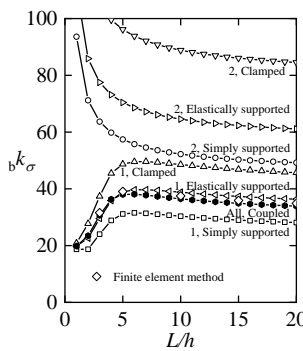


Fig. 7 Effects of boundary conditions

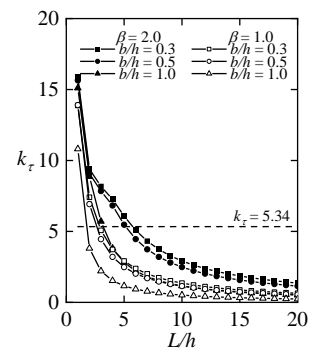


Fig. 8 Comparison with previous studies of web

荷重条件の影響を考慮した座屈性状を明らかにするため、図 10 に曲げモーメント勾配をパラメータとしたときの座屈係数と辺長比の関係を示す。図から、断面辺長比によらず現実的な辺長比の範囲では曲げモーメント勾配の増大に伴い座屈耐力は大きくなる。

せん断と曲げの相互作用と部材形状の影響を考慮した長方形中空断面部材の板要素連成弾性局部座屈耐力を算定する。はじめに、純曲げ($\beta=0.0$)を受ける場合の座屈耐力を算定する。なお、純曲げを受ける場合の解析結果は図 10, 11 に白抜きプロットで示している。図 10, 11 から、純曲げを受ける場合の座屈耐力は辺長比の影響をほとんど受けていない。そこで、図 11 に示す座屈係数と断面辺長比の関係を表 3 中の式(1)により近似する。

次に、せん断曲げ($\beta \neq 0.0$)を受ける場合の座屈耐力を算定する。曲げモーメント勾配による座屈耐力の上昇率を調べるため、図 12 に座屈耐力比とせん断曲げ比の関係を示す。この図の縦軸はある曲げモーメント勾配の座屈耐力を曲げモーメント勾配が 0 の座屈耐力で除した座屈耐力比である。また、横軸は断面内のせん断応力度の最大値と曲げ応力度の最大値の比である。ここで、長方形中空断面部材におけるせん断曲げ比は表 3 中の式(2)により表される。図から、せん断曲げ比の増大に伴い座屈耐力比は大きくなる。そこで、曲げモーメント勾配による座屈耐力の上昇率を表 3 中の式(3)により近似する。式(1)~(3)により、せん断曲げを受ける場合の座屈耐力を式(4)で表すことができる。なお、式(4)による算定値と解析値との比較を図 10 に示す。図から、式(4)により妥当な座屈係数が得られるといえる。なお、適用範囲は表 3 中に示す。

以上は部材両端の境界条件が固定支持の場合の座屈耐力算定式であるが、同様の方法により部材両端の境界条件が単純支持の座屈耐力算定式を作成すると式(5)となる。

4. 2 純曲げを受ける薄板角形鋼管部材の座屈後耐力

図 13 に荷重—変位関係($M/M_y - \theta/\theta_y$)を示す。図中に、実験結果と解析結果を示している。形状初期不整の最大元たわみは(a)が $0.01t$ と $0.1t$ の場合、(b)が t と $2t$ の場合である。また、エネルギー法による弾性局部座屈耐力(M_{cr}/M_y)も示している。図から、実験における大変形挙動は解析と比較して初期剛性が低い。この要因の一つとして、フランジ溶接部の残留応力の影響が考えられる。一方で、座屈後耐力は概ね一致している。また、元たわみの増大に伴い、剛性や最大耐力がやや低下していることが分かる。

図 14 に M_{cr} 到達時・ M_{max} 到達時・ $0.9M_{max}$ 到達時の圧縮フランジ中央における材軸方向ひずみ度分布の変化履歴を示す。試験体 1.0_1.0 は圧縮フランジで局部座屈が発生しており、ひずみが圧縮側と引張側に生じていることが確認できる。また、最終的に座屈変形が大きくなる点で徐々にひずみ度が増大していることが分かる。

図 15 に M_{cr} 到達時・ M_{max} 到達時の断面内におけるひずみ度分布を示す。図から、 M_{cr} 到達時から M_{max} 到達時に進むにつれて、圧縮領域のウェブフランジ接合辺近傍で大きなひずみ度が生じている。これは、応力再配分の作用であると考えられる。

写真 1 に実験における最終変形形状を示す。また、図 16 に解析における最終変形形状を示す。写

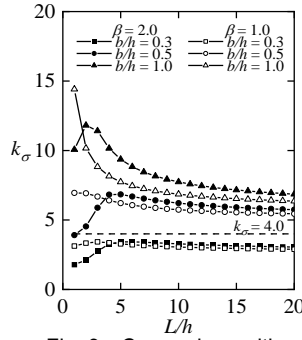


Fig. 9 Comparison with previous studies of flange

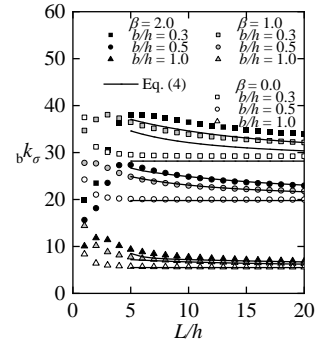


Fig. 10 Effects of gradient of bending moment

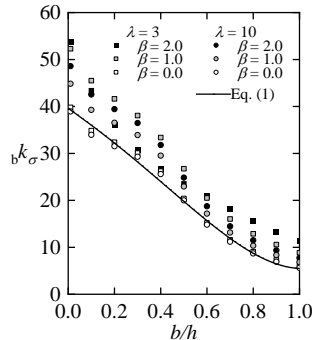


Fig. 11 Effects of cross section ratio

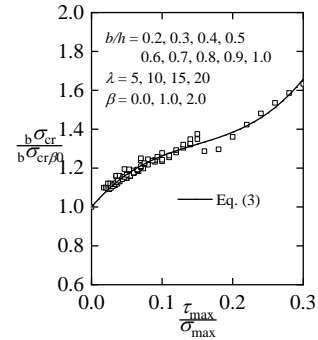
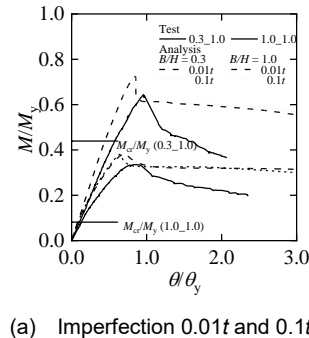


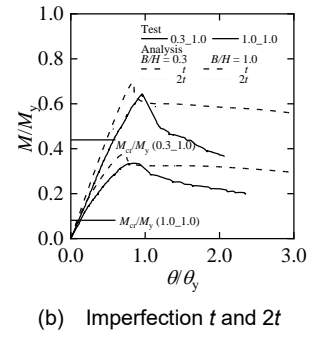
Fig. 12 Effects of shear bending ratio

Table 3 Calculation formula for plate elements coupled elastic local buckling strength of rectangular hollow section members

Clamped at both ends ($0.2 \leq b/h \leq 1.0, 5 \leq \lambda, 0.0 \leq \beta \leq 2.0$)		
$k_{\sigma\beta 0} = 21.6 \left(\frac{b}{h}\right)^4 - 11.8 \left(\frac{b}{h}\right)^3 - 9.0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 - 34.9 \left(\frac{b}{h}\right) + 39.6$ (1)		
$\frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \eta = \frac{\beta}{4.0\lambda} \left[1.0 + 2.0 \left(\frac{b}{h}\right)\right]$ (2)	$\frac{k_{\sigma\beta}}{k_{\sigma\beta 0}} = 1.0 + 4.3\eta - 21.7\eta^2 + 48.8\eta^3$ (3)	
$k_{\sigma} = \left\{21.6 \left(\frac{b}{h}\right)^4 - 11.8 \left(\frac{b}{h}\right)^3 - 9.0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 - 34.9 \left(\frac{b}{h}\right) + 39.6\right\} (1.0 + 4.3\eta - 21.7\eta^2 + 48.8\eta^3)$ (4)		
Simply supported at both ends ($0.2 \leq b/h \leq 1.0, 5 \leq \lambda, 0.0 \leq \beta \leq 2.0$)		
$k_{\sigma} = \left\{21.6 \left(\frac{b}{h}\right)^4 - 11.8 \left(\frac{b}{h}\right)^3 - 9.0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 - 34.9 \left(\frac{b}{h}\right) + 39.6\right\} (1.0 + 1.9\eta - 8.8\eta^2 + 18.4\eta^3)$ (5)		



(a) Imperfection 0.01t and 0.1t



(b) Imperfection t and 2t

Fig. 13 Load-displacement relationship

真と図から、圧縮フランジは断面の内側に変形しており、ウェブは連成して断面の外側に変形している点が概ね一致している。

ここで、薄板軽量形鋼の座屈後耐力評価法として、AISI 指針において設計式として採用されている DSM (Direct Strength Method)がある⁸⁾。この方法は降伏耐力に対する基準化最大耐力 M_{max}/M_y を座屈耐力による基準化幅厚比 $\sqrt{M_y/M_{cr}}$ の関数として表した評価式で、表 4 中の式(6)のように与えられる。

図 17 に実験と解析によって得られた基準化最大耐力と基準化幅厚比の関係を示す。図では、式(6)の耐力評価式も表している。安全側の評価を意図して、形状初期不整の最大元たわみを (a)は t , (b)は $2t$ としている。なお、解析には 2 種類の材料データを用いている。また、実験結果は×と試験体名で表している。図から、実験結果と解析結果および評価式は概ね一致していることが分かる。したがって、純曲げを受ける薄板角形鋼管部材の場合も、座屈耐力を正確に評価することで、座屈後耐力の評価が可能になる。また、(a)と(b)を比較すると最大元たわみが基準化最大耐力に及ぼす影響は大きくないことが分かる。

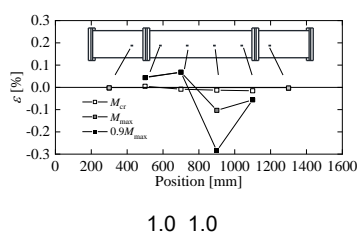
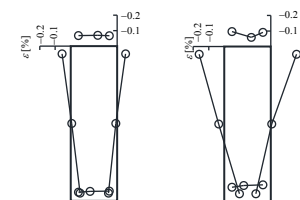


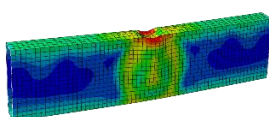
Fig. 14 Strain distribution along longitudinal direction



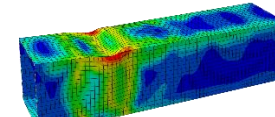
(a) Local strength (b) Ultimate strength
Fig. 15 Strain distribution in member section



(a) 0.3_1.0
Photo 1 Deformed configuration in loading test



(a) 0.3_1.0

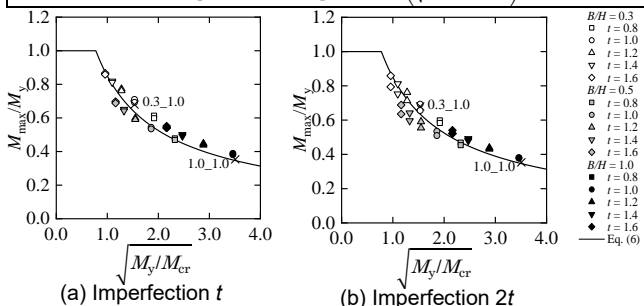


(b) 1.0_1.0

Fig. 16 Deformed configuration in FEM

Table 4 Ultimate strength formula in AISI

$$\frac{M_{max}}{M_y} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{cr}}{M_y} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{cr}}{M_y} \right)^{0.4} \left(\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}} > 0.776 \right) \quad (6)$$



(a) Imperfection t (b) Imperfection $2t$
Fig. 17 Normalized ultimate strength width-thickness ratio relationship

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟：薄板軽量形鋼造建築物設計の手引き，2014
- 2) 日本建築学会：鋼構造許容応力度設計規準，2019
- 3) 小橋知季，五十嵐規矩夫，清水信孝：曲げと圧縮が作用する薄肉長方形断面部材の弾性局部座屈耐力および最大耐力，日本建築学会構造系論文集，Vol. 84，No. 755，pp. 97-107，2019
- 4) Vieira, L., Goncalves, R., and Camotim, D.: On the Local Buckling of RHS Members under Axial Force and Biaxial Bending, *Thin-Walled Structures*, Vol. 129, pp. 10-19, 2018
- 5) 木村衛，井上哲郎，谷口元，橋村徹，小松健：薄板の座屈後耐力，日本建築学会構造系論文集，Vol. 66，No. 545，pp. 135-140，2001
- 6) Timoshenko, S. P. and Gere, J. M.: *Theory of Elastic Stability*, 1961
- 7) Schafer, B. W., Li, Z., and Moen, C. D.: Computational Modeling of Cold Formed Steel, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 752-762, 2010
- 8) American Iron and Steel Institute: *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, 2016

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井上公甫, 佐藤公亮
2. 発表標題 せん断曲げを受ける長方形中空断面部材の板要素連成弾性局部座屈耐力の導出
3. 学会等名 日本建築学会東海支部研究集会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kosuke Inoue and Kosuke Sato
2. 発表標題 Derivation of Elastic Local Buckling Strength of Rectangular Hollow Section Members Considering Coupled Effects of Plate Elements
3. 学会等名 International Symposium for Social Infrastructure and Production (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤公亮, 斉藤智
2. 発表標題 せん断曲げを受けるリップ溝形断面部材板要素の弾性座屈耐力評価 その1 エネルギー法による解析概要
3. 学会等名 日本建築学会大会（北海道）学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斉藤智, 佐藤公亮
2. 発表標題 せん断曲げを受けるリップ溝形断面部材板要素の弾性座屈耐力評価 その2 エネルギー法による解析結果
3. 学会等名 日本建築学会大会（北海道）学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上公甫, 佐藤公亮
2. 発表標題 せん断曲げを受ける長方形中空断面部材板要素の弾性座屈耐力評価
3. 学会等名 日本建築学会大会(北海道)学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐藤公亮, 中野泰我, 小橋知季
2. 発表標題 曲げせん断力を受ける長方形中空断面部材板要素の弾性局部座屈耐力
3. 学会等名 日本建築学会大会(東海)学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野泰我, 佐藤公亮, 小橋知季
2. 発表標題 曲げせん断力を受ける薄板長方形中空断面部材の座屈後耐力
3. 学会等名 日本建築学会大会(東海)学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野泰我, 佐藤公亮, 小橋知季
2. 発表標題 曲げせん断力と軸圧縮力を受ける長方形中空断面部材の弾性局部座屈耐力
3. 学会等名 日本建築学会大会(関東)学術講演会
4. 発表年 2020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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------