

研 究 報 告

令和 8 年 4 月 23 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 三重大学大学院工学研究科建築学専攻

氏 名 : 佐藤 公亮

研究課題名 : 激甚連発地震を受ける冷間成形角形鋼管柱の超多数回繰返し局部座屈
挙動と耐震性能

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 7 年 4 月 1 日 ～ 至 令和 8 年 3 月 3 1 日

激甚連発地震を受ける冷間成形角形鋼管柱の

超多数回繰返し局部座屈挙動と耐震性能

Ultra Multiple Cyclic Local Buckling Behavior and Seismic Performance
of Cold-Formed Square Steel Tube Columns under Severe Continuous Earthquakes

三重大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授 佐藤公亮

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. 序

日本では巨大地震が懸念されており、建築物の正確な耐震性能評価が求められている。一方で、E-ディフェンスにおいて実施された大規模振動実験[1]などにより、鋼構造建築物の倒壊原因は柱の局部座屈であることが知られている。鋼構造建物では柱材として冷間成形角形鋼管が広く使用されており、冷間成形角形鋼管柱の局部座屈を伴う大変形挙動は建物の耐震性能決定要因となるため、その局部座屈挙動を解明することは重要である。そこで本研究では、角形鋼管柱の局部座屈を研究対象としている。

角形鋼管部材の局部座屈に関する研究[2]~[6]はこれまで数多く行われているが、塑性加工を受けた冷間成形角形鋼管柱が、一定圧縮と繰返しせん断曲げを受ける場合の局部座屈挙動は十分に検討されていない。特に既往の研究では水平一方向載荷による検討が行われてきたが、地震時の柱には水平直交方向に二次元的に荷重が作用する。しかし、実際の柱に作用する荷重条件に近い一定圧縮と二方向繰返しせん断曲げを受ける場合の局部座屈挙動は十分に明らかにされていない。さらに、耐震性能については文献[7], [8]において、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 S_H を用いて一定圧縮と単調せん断曲げを受ける場合の最大耐力と塑性変形能力は体系的に評価されているが、水平直交二方向の繰返し荷重を受ける冷間成形角形鋼管柱の耐震性能の体系的評価は十分に行われていない。そのため、新規幅厚比尺度 S_H による耐震性能評価が一定軸力と二方向水平力を受ける場合に対して適用可能かを検討する必要がある。

そこで本研究では、冷間成形角形鋼管柱を対象として、実験的検討に先立ち、有限要素法解析を実施し、水平直交方向の載荷履歴が大変形挙動に及ぼす影響を検討する。また、一定圧縮と二方向繰返しせん断曲げを受ける場合の耐力上昇率と塑性変形倍率を新規幅厚比尺度 S_H により評価することを目的とする。

（実験調査によって得られた新しい知見）

2. 冷間成形角形鋼管柱の有限要素法解析概要

本研究では、汎用有限要素法解析プログラム Abaqus を使用し、一定圧縮と二方向繰返しせん断曲げを受ける冷間成形角形鋼管柱の大変形解析を行う。

図1に解析モデルを示す。解析モデルの形状については、全幅 B を 200, 400 mm, 板厚 t を 6~19 mm と変化させることで、幅厚比 B/t の影響を検討している。また、材長 L は全幅 B に合わせて 1200, 2000, 2400, 4000 mm とし、辺長比 L/B の影響も検討している。なお、角部曲率半径 R は冷間ロール成形角形鋼管の標準値である板厚 t の 2.5 倍としている。解析モデルは4節点シェル要素で構成されており、要素分割については、周方向に平板部を12分割、角部を4分割している。また、材軸方向は平板部が概ね正方形となるように辺長比 L/B の16倍で分割している。

解析モデルの境界条件と荷重条件は図 1 に示すとおりであり、地震荷重を受ける場合の柱を想定した条件としている。境界条件は、柱脚では二方向の板幅方向の変位のみ、柱頭では材軸方向の変位を自由としている。また、柱頭で回転の自由度を変えることで各方向の曲げモーメント勾配 β_x, β_y を一端曲げの場合は 1、逆対称曲げの場合は 2 に変化させている。荷重条件は、柱頭で軸圧縮力 P を作用させ、柱脚で各方向に強制変位 Δ_x, Δ_y を与えている。ここで軸力比 n は、軸圧縮力 P を降伏軸力 P_y で除した比とし、本解析では軸力比 n を 0.3 とした。各方向の曲げモーメント M_x, M_y は柱脚側における曲げモーメントであり、軸圧縮力による付加曲げモーメント $P\Delta_x, P\Delta_y$ を考慮して計算している。各方向の部材角 θ_x, θ_y は柱脚における各方向の変位 Δ_x, Δ_y を材長 L で除して算出している。また、本研究において、各方向の曲げモーメント M_x, M_y および各方向の部材角 θ_x, θ_y は軸圧縮力の影響を考慮した全塑性モーメント M_{pc} と全塑性モーメント相当部材角 θ_{pc} で基準化している。

図 2 に二方向の载荷履歴 (History-A, History-B) と解析パラメータを示す。パラメータは载荷履歴、曲げモーメント勾配、幅厚比、辺長比、材料特性の 5 つである。

载荷履歴は、降伏モーメント相当部材角で正負に 3 回ずつ加力した後、全塑性モーメント相当部材角 θ_{pc} の自然数倍による強制変位 Δ_x, Δ_y で制御する。本研究では、 x 方向を各振幅 3 回ずつ正負交番の漸増繰返し载荷とし、 y 方向の载荷履歴を変えることで二方向繰返しせん断曲げが大変形挙動に及ぼす影響を検討する。なお、 y 方向の载荷履歴は二次元の载荷履歴とするため 1/4 サイクル遅らせて载荷する。History-A は y 方向の载荷履歴を x 方向と同様の载荷履歴とし、History-B は定振幅载荷 (振幅 $\theta_y/\theta_{pc} = 1, 2, 3$) としている。また、比較のため x 方向のみに 3 回ずつ正負交番の漸増繰返し载荷を適用した解析も実施する。

3. 局部座屈挙動に及ぼす二方向繰返し荷重の影響

本章では、材料特性として材料 A、部材形状として全幅 B を 200 mm、板厚 t を 8 mm、材長 L を 1200 mm、荷重条件として軸力比 n が 0.3、両方向逆対称曲げの繰返し载荷を基本の条件として、二方向繰返し荷重が局部座屈挙動に及ぼす影響を検討する。

直交方向の繰返し荷重が冷間成形角形鋼管柱の局部座屈挙動に及ぼす影響を検討するために、図 3 に一方向载荷および二方向载荷時 (History-A) による载荷時の x 方向における荷重変位関係の一例を示す。図 6 から、最大耐力時の塑性変形能力に大きな差はないものの、二方向载荷時は一方向载荷時に比べ最大耐力が低下していることが分かる。これは、二方向载荷の場合、平板部のみならず角部にも大きな応力度が生じる場合があるため、一方向载荷時に比べ角部が早期に降伏することで、平板部に対する角部の拘束効果が低下したことが要因の 1 つであると考えられる。

次に、図 4 に一方向载荷時および History-A による二方向载荷時の最終変形形状の一例を示す。図から、一方向载荷時の図 4(a) の場合、ウェブとフランジで変形する方向が断面の内側と外側で逆になるのに対し、二方向载荷時の図 4(b) では、全ての板要素が断面の外側に変

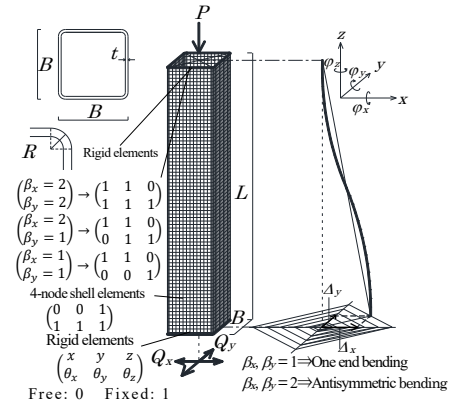


Fig. 1 Analysis model

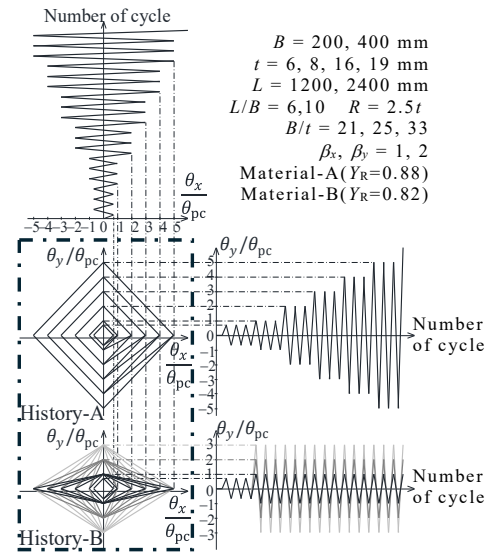


Fig. 2 Loading history and analysis parameters

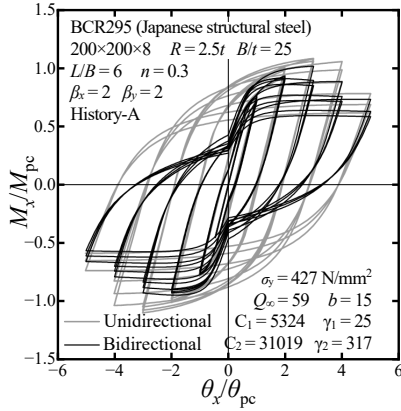


Fig. 3 Effect of bidirectional loading

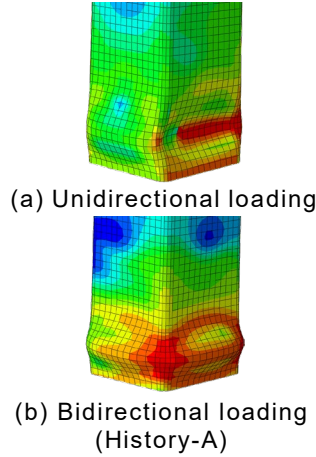


Fig. 4 Final deformed configuration

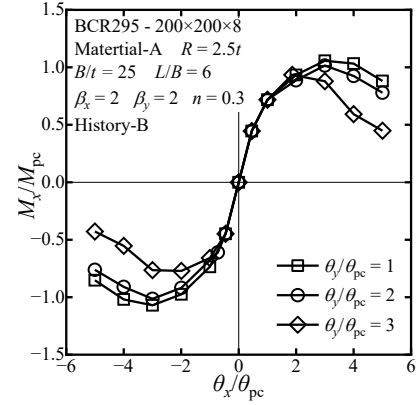


Fig. 5 Effect of loading amplitude in y-direction

形していることが確認できる．また，多くの History-A による二方向載荷の解析においてこのような座屈形状が確認された．これは，各方向が同様の載荷履歴であるため，各板要素が同程度の応力度を負担することで同様の变形形状になるためであると考えられる．

次に， y 方向の載荷履歴の振幅が角形鋼管柱の局部座屈挙動に及ぼす影響を検討するために，図 5 に載荷履歴が History-B 時の y 方向の振幅 θ_y/θ_{pc} をパラメータとした x 方向の荷重変位関係を包絡線として示す．図から， y 方向の載荷振幅が増加することで最大耐力が低下していることが読みとれる．これは， y 方向載荷時に各板要素が負担する応力度が大きくなるためであると考えられる．また， $\theta_y/\theta_{pc} = 3$ において最大耐力とその時の塑性変形能力が大きく低下することが確認できる．これは， y 方向で先に局部座屈が発生して最大耐力を迎えたためである．

4. 二方向繰返し荷重を受ける場合の耐震性能

本研究では，幅厚比のみならず辺長比や曲げモーメント勾配，軸力比の影響も考慮するために，文献[7]，[8]で提案されている新規幅厚比尺度 $S_H = \sqrt{M_{pc}/M_{cr}}$ により，二方向繰返し荷重時の最大耐力及び塑性変形能力との関係性を検討する．

まず，一定圧縮と二方向繰返しせん断曲げを受ける場合の最大耐力について評価するために，図 6 に耐力上昇率 M_{xmax}/M_{pc} ， M_{ymax}/M_{pc} と新規幅厚比尺度 S_H との関係性を材料ごとに示す．図中のプロットの凡例を表 1 に示す．断面形状は，3 章で検討した全幅 B が 200 mm の断面に加え，全幅 B を解析パラメータとするために 400 mm の断面も検討している．また，図 6 に単調載荷時の評価式(6)[10]も併せて実線で示している．図 6 から，材料によらず載荷履歴の違いによる最大耐力の差は小さい．また，降伏比 Y_R が 88%と高い材料 A を用いて行った解析結果は，既往の評価式(6)と比較して大きく低下していることが読みとれる．一方で，降伏比 Y_R が 82%である材料 B を用いて行った解析の耐力上昇率は，載荷履歴等によらず既往の評価式で概ね傾向はとらえられているものの，単調載荷時より 5%程度低い値となる傾向が読みとれる．

次に，塑性変形能力の評価を行うために，図 8 に最大耐力時の塑性変形倍率 $\theta_{xmax}/\theta_{pc}-1$ ， $\theta_{ymax}/\theta_{pc}-1$ と新規幅厚比尺度 S_H との関係性を材料ごとに示す．履歴曲線から得た塑性変形能力は載荷履歴に依存しており，累積ひずみの影響を考慮できないため，本研究では，拡張骨格曲線[11]を作成し，その時の最大耐力時の塑性変形能力を評価する．図 7 に拡張骨格曲線の定義を示す．拡張骨格曲線は，最大耐力までは骨格曲線とし，最大耐力以降は荷重変位関係の正側のサイクルを順につなぎ合わせて作成した累積荷重変位関係の包絡線として作成している．なお，図のプロットと解析パラメータは図 6 と同様であり，単調載荷時の評価式(7)も併せて実線で示している．図 8 から，既往の評価式(7) [9]により二方向載荷時の塑性変形能力を概ね評価することができている．

Table 1 List of plots

Loading history	β_x, β_y	History-A		History-B											
				$\theta_x/\theta_{pc} = 1$				$\theta_x/\theta_{pc} = 2$				$\theta_x/\theta_{pc} = 3$			
		1, 1	2, 1	2, 2	1, 1	2, 1	2, 2	1, 1	2, 1	2, 2	1, 1	2, 1	2, 2	1, 1	2, 2
$L/B = 6$	200×200×6	□	□	□	□	□	□	■	■	■	■	■	■	■	■
	200×200×8	△	△	△	△	△	△	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
	400×400×16	▷	▷	▷	▷	▷	▷	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶	▶
	400×400×19	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
$L/B = 10$	200×200×6	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
	200×200×8	▽	▽	▽	▽	▽	▽	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
	400×400×16	◁	◁	◁	◁	◁	◁	◀	◀	◀	◀	◀	◀	◀	◀
	400×400×19	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●

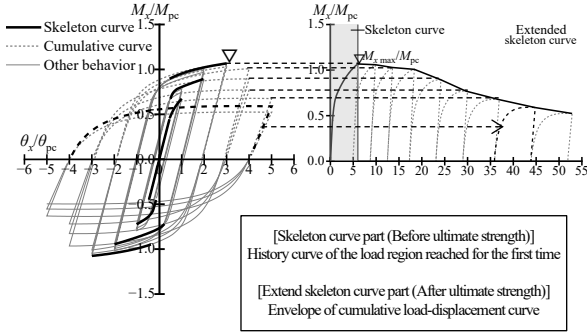


Fig. 7 Definition of extended skeleton curve

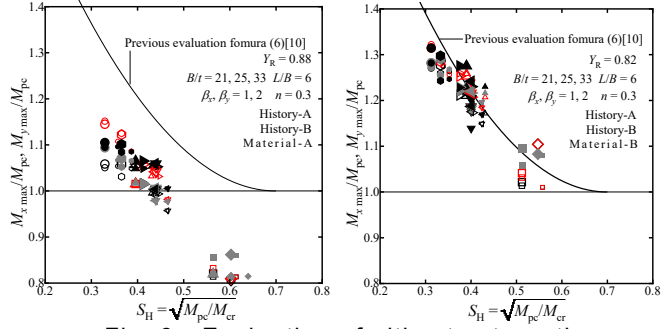


Fig. 6 Evaluation of ultimate strength

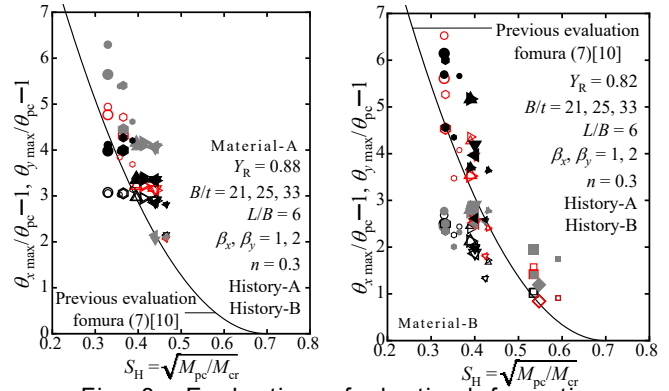


Fig. 8 Evaluation of plastic deformation

5. 結

本研究では、一定圧縮と二方向繰返しせん断曲げを受ける冷間成形角形鋼管柱について有限要素法大変形解析を実施し、2種類の载荷履歴により直交方向の载荷履歴が局部座屈挙動に及ぼす影響を検討した。また、最大耐力及び塑性変形能力を新規幅厚比尺度 S_H との関係として示した。

また、二方向繰返しせん断曲げを受ける場合は、一方向繰返しせん断曲げを受ける場合に比べ最大耐力が低下することを明らかにした。また、最終変形形状について、二方向载荷の場合、全ての板要素が断面の外側に変形する場合があることを示した。

得られた解析結果から耐力上昇率及び塑性変形倍率と新規幅厚比尺度 S_H との関係性を調べ、既往の単調载荷時の評価式により評価した。最大耐力については、降伏比が88%と高い場合は大きく低下する。塑性変形能力については、履歴曲線から得た値では载荷履歴の影響を受けるため、多くの条件で既往の単調载荷時の評価式より下回るが、拡張骨格曲線から得た値により概ね評価が可能となる。

参考文献

- [1] 久保田淳, 高橋元美, 鈴木芳隆, 澤本佳和, 聲高裕治, 伊山潤, 長江拓也: 鉄骨造18層骨組を対象とした振動台実験における長周期地震動による骨組崩壊挙動, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 83, No. 746, pp. 625-635, 2017
- [2] 桑田涼平, 聲高裕治, 吹田啓一郎: 局部座屈と破断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, Vol. 80, No. 718, pp. 1961-1970, 2015
- [3] 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载荷実験, 鋼構造論文集, Vol. 23, No. 90, pp. 51-64, 2016
- [4] 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, Vol. 82, No. 735, pp. 701-711, 2017
- [5] 三井和也, 松本樹, 五十嵐規矩夫: 繰返し载荷履歴が矩形中空断面材の局部座屈を伴う劣化挙動に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 88, No. 813, pp. 1569-1580,

2023

- [6] 山田哲, 石田孝徳, 島田侑子, 松永達哉: 一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の繰返し載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 78, No. 683, pp. 203-212, 2013
- [7] 佐藤公亮, 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, Vol. 82, No. 731, pp. 123-133, 2017
- [8] 佐藤公亮: 正方形中空断面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, Vol. 25, pp. 233-238, 2017
- [9] 佐藤公亮: 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・塑性変形能力評価法, 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, 構造Ⅲ, No. 22495, pp. 989-990, 2020
- [11] 山田哲, 石田孝徳, 島田侑子: 局部座屈を伴う角形鋼管柱の劣化域における履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 77, No. 674, pp. 627-636, 2012

(発 表 論 文)

- (1) Junichiro Tatematsu and Kosuke Sato: Analytical Study on Dynamic Cyclic Local Buckling Behavior and Seismic Performance of Cold-Formed Square Steel Tube Columns, *Proceedings of 10th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 25873, pp. 1-13, 2025
- (2) 佐藤公亮, 立松純一郎, 木藤一輝, 薩川恵一: 冷間成形角形鋼管柱の二方向繰返し局部座屈と最大耐力及び塑性変形能力 その 1 有限要素法解析概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp. 1407-1408, 2025
- (3) 立松純一郎, 佐藤公亮, 木藤一輝, 薩川恵一: 冷間成形角形鋼管柱の二方向繰返し局部座屈と最大耐力及び塑性変形能力 その 2 載荷履歴の影響と耐震性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp. 1409-1410, 2025
- (4) 立松純一郎, 佐藤公亮, 木藤一輝, 薩川恵一: 二次元繰返しせん断曲げを受ける冷間成形角形鋼管柱の局部座屈耐力と塑性変形性能, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 33, pp. 649-657, 2025
- (5) 佐藤公亮, 立松純一郎, 木藤一輝, 薩川恵一: 変動軸力と二方向繰返し曲げを受ける冷間成形角形鋼管柱の局部座屈耐力と塑性変形性能 その 1 有限要素法解析概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2025 (発表予定)
- (6) 立松純一郎, 佐藤公亮, 木藤一輝, 薩川恵一: 変動軸力と二方向繰返し曲げを受ける冷間成形角形鋼管柱の局部座屈耐力と塑性変形性能 その 2 変動軸力の影響と耐震性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2025 (発表予定)