

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06635

研究課題名(和文)被災した鋼構造建築における柱・梁の残余耐震性能推定方法に関する研究

研究課題名(英文) Estimation of residual seismic resistance of damaged steel member in buildings

研究代表者

松本 由香 (Matsumoto, Yuka)

横浜国立大学・大学院都市イノベーション研究院・教授

研究者番号：70313476

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、巨大地震によって被災した鋼部材の損傷度および残余耐震性能を、現地調査によって定量的に推定することを意図している。特に、軽微な局部座屈を検知できるように断面フランジの面外変形を計測する方法を考案した点に特色がある。BCR295角形鋼管、SN400BのH形断面を対象に繰り返し載荷実験を行い、塑性変形の進行に伴うフランジ面外変形の成長を追跡した。また、幅厚比と軸力比をパラメータとして角形鋼管の有限要素解析を行い、各因子がフランジ面外変形  $\delta$  に及ぼす影響を調査した。この結果を踏まえ、角形鋼管柱について  $\delta$  をフランジ幅で基準化した値 ( $\delta/B$ ) と部材の累積部材角の関係を表す近似式を導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、被災後の建築物の継続使用や迅速な復旧、交通などの都市機能の保全を求める機運が高まり、従前よりも巨大地震に対する構造骨組の損傷を低減させる設計が志向されるようになった。これらの良質な建築ストックを被災後も有効に活用するためには、構造骨組の損傷や残余耐震性能を判定する技術が必要となる。一方、鋼構造建築物は損傷の度合いを段階的に推定することが困難であり、被災後の残余耐震性能を判定する技術は確立されていない。本研究は、鋼部材の局部座屈波形を計測する方法を提案し、塑性変形による損傷と局部座屈波形の関係を解明したものであり、残余耐震性能の判定方法を改善する上で有用な知見を与えている。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to derive the estimation method of residual seismic resistance of steel members which have been plastically damaged by severe earthquake. A measuring method of section shape was proposed for on-site inspections in order to detect out-of-plane deformation due to slight local buckling. The target is square-HSS members manufactured from BCR295, and I-shaped members manufactured from SN400B. A series of cyclic loading tests and finite element analysis was carried out and the out-of-plane deformation of the section's flange,  $\delta$ , and cumulative plastic deformation was investigated. The width-to-thickness ratio and axial force were taken as parameters. As the result,  $\delta/B$ , the normalized  $\delta$  by flange width was proportional to fourth power of the width-to-thickness ratio and square of the axial force ratio, and an equation for square-HSS column was derived to approximate the relation between the  $\delta/B$  and cumulative plastic deformation.

研究分野：鋼構造

キーワード：鋼構造 被災建築物 塑性変形 局部座屈 面外変形 残余耐震性能

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

現行の建築法制は、極稀に発生する巨大地震に対して建物の倒壊を防ぐことを狙いとしており、建物の継続使用や修復可能性は担保されていない。しかし、都市部における避難スペースの不足、被災後の事業継続性、交通などの都市機能の保全に対するニーズの高まり、省エネルギー・省資源による環境負荷の低減などを鑑みて、巨大地震に対する損傷を軽減し、被災後も継続使用や補修による復旧が可能な建物が求められている。これらの良質な建築ストックを有効活用するためには、被災後の構造部材の残余耐震性能の評価精度を向上させ、骨組や部材が継続使用可能かどうかを判定する技術を開発する必要がある。

しかし、鉄筋コンクリート構造のように損傷の度合いに応じてひび割れが進行する構造種別と比べて、鋼構造建築物は損傷の度合いを目視で判定することが困難であり、特に、明白な局部座屈や破断などが生じていない段階の損傷を定量的に判定することはできない。日本建築防災協会の「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」<sup>1)</sup>（以降、被災度判定基準）においても、塑性化や局部座屈の進行について曖昧で感覚的な方法に頼って判定を行っており、残余性能の評価方法についても現状では学術的な裏付けが不十分である。

一方、近年では変位センサーや計測データ収録機器の小型化・高性能化が進み、建設現場に携行可能なデータロガーが普及しつつある。被災後の現地調査において、従前より高い精度で鋼構造部材の変形を計測することができれば、損傷度や残余耐震性能の判定方法を改善できる可能性がある。

### 2. 研究の目的

鋼部材の構造性能を低下させる現象の一つに局部座屈が挙げられる。幅厚比が小さく塑性変形性能に富んだ柱・梁に局部座屈が生じる場合、断面を構成する板要素に微小な面外変形が生じた後も、しばらく耐力を保持することができる。この微小な面外変形を検知することができれば、修復せずに継続使用可能な部材を選別することができ、合理的な復旧計画を立案することができる。

本研究では、断面形状を計測して局部座屈波形の成長を定量的に把握することによって、鋼部材の損傷度および残余耐震性能の推定方法を構築することを目的とする。特に、被災後の継続使用が期待される FA ランクの柱・梁を対象とする。本申請の範囲では、2つの変位計を組み合わせることによって、部材断面を構成する板要素の局部座屈による面外変形を波形として計測する方法を開発する。さらに、柱・梁が受けた塑性変形と局部座屈による面外変形の関係を定量化し、断面形状の計測結果から部材の損傷を推定し、残余変形性能を判定する方法を提案する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 鋼部材の繰返し载荷試験

载荷試験では、FA ランクの柱・梁を想定し、以下の角形鋼管と H 形断面の繰返し载荷を行った。

角形鋼管：BCR295，□-200×200，幅厚比  $B/t=22.2\sim 25.1$ ，軸力比  $\rho=0\sim 0.3$

H 形断面：SN400B，H-200×200，フランジ幅厚比  $=6.3\sim 8$ ，軸力比  $\rho=0\sim 0.3$

図 1 にセットアップを示す。試験体上部はクレビスと接続し、せん断スパン 1147 mm とした。試験体に目標軸力比に対応する鉛直荷重  $P_v$  を導入し、 $P_v$  を一定に保ちながら水平方向強制変位を与えた。载荷履歴は正負交番漸増振幅载荷であり、材端モーメントが全塑性モーメント計算値に達した時の弾性限部材角  $\theta_p$  を基準とし、 $2\theta_p \times 2$  サイクル、 $4\theta_p \times 2$  サイクル...の要領で振幅を漸増させた。

载荷中は、図 2 に示す要領で部材断面のフランジ形状を計測した。材軸方向に設置したスライドルール上でレーザー変位計を移動させ、フランジ表面までの X 方向変位を計測するとともに、ワイヤー変位計によってレーザー変位計の Y 方向移動量を同時計測した。レーザー変位計の移動速度は約 15mm/sec とし、データは動ひずみ計を用いて 0.005s 間隔(200Hz)でサンプリングした。計測した波形から局部座屈の一波長分を抽出し、その振幅  $\delta_0$  が部材の累積塑性変形に応じて増幅していく過程を追跡した。

#### (2) 有限要素解析

実験で得られた知見の一般性を検証するために有限要素解析を行った。

まず、(1)の部材実験を有限要素解析によって再現し、解析モデルや解析条件の妥当性の検証を行った。図 3 に解析モデルを示す。ベースプレート上面からクレビス中心までを同一断面部材とし、対称性を考慮して全体の 1/2 を 8 節点 6 面体要素でモデル化した。塑性化領域の要素分割は、フランジ一辺を 6 分割、材軸方向 5mm、板厚方向 6 分割とする。対称軸上の節点の Y 方向並進変位を拘束し、柱脚の節点は X・Y・Z 方向並進変位を拘束した。材料特性は、素材引張試験結果を真応力-真歪関係に換算して入力し、Von Mises の降伏条件及び移動硬化則を仮定した。また、冷間ロール成形による残留応力を初期応力として付与し、フランジ面に初期たわみを付与した。初期たわみは波長  $L_b=160\text{mm}$  の正弦波とし、正弦波の振幅はフランジ幅の 1/1000 とした。解析には汎用プログラム Marc Mentat 2017.0.0 を用い、幾何学非線形を考慮した。

以上の条件によって解析したところ、荷重変形関係やフランジ面外変形に関する解析値は実験値と概ね一致し、解析方法の妥当性が確認された。

次に、角形鋼管 BCR295 について下記のパラメータを設定して有限要素解析を行った。

断面幅  $B=200\sim 400\text{mm}$ ，幅厚比  $B/t=16.7\sim 25$ ，軸力比  $\rho=0.15\sim 0.3$

解析モデルの要素分割、境界条件、材料特性等の解析条件は部材実験の再現解析と同一である。部材実験と同様に、フランジに現れる局部座屈波形の振幅  $\delta_o$  と累積塑性変形の関係を追跡した。

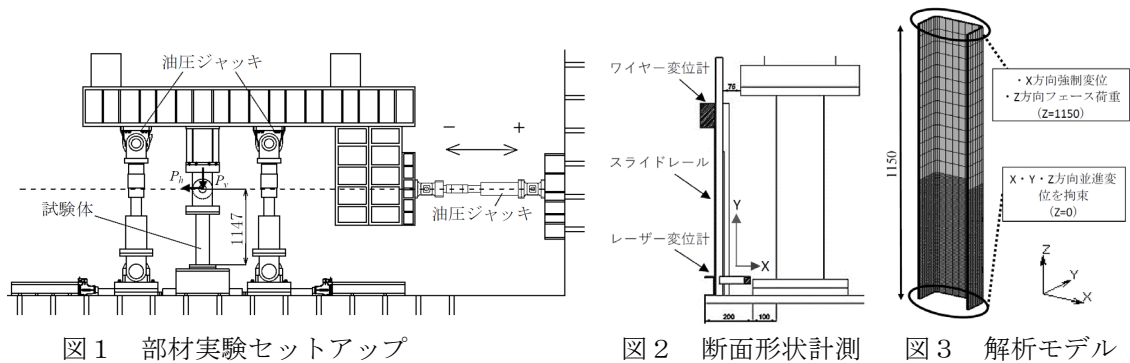


図1 部材実験セットアップ

図2 断面形状計測

図3 解析モデル

#### 4. 研究成果

##### (1) 局部座屈波形の検出

図4に、部材実験において計測された局部座屈波形の一例を示す。角形鋼管についてはフランジ中央、H形断面についてはフランジ端面から10mmにおけるライン上の計測結果である。面外変形が微小な段階では、目視や触感から局部座屈の発生を検知することは困難であるが、本研究で提案した計測方法によって面外変形を波形として捉え、 $\delta_o \leq 1\text{mm}$ 程度でも座屈波が形成されていることを検知することができた。

##### (2) 局部座屈によるフランジ面外変形と塑性変形の関係

角形鋼管柱の有限要素解析により、局部座屈波形の振幅  $\delta_o$  を断面幅  $B$  で基準化し、柱の累積部材角  $c\theta$  との関係性を調査した。

$B=400\text{mm}$ ， $\rho=0.2$  のモデルを例に、 $\delta_o/B$  と  $c\theta \times (B/t)^2$  の関係を図5(a)に示す。図中の凡例は幅  $B$  - 板厚  $t$  を示す。 $c\theta$  が同一の場合、 $\delta_o/B$  は  $B/t$  が大きくなるに従って上昇する傾向があるが、図5(a)のように  $c\theta \times (B/t)^2$  を横軸に用いると、 $B/t$  の異なるデータが同一の放物線上に分布する。

$B=400\text{mm}$ ， $t=19\text{mm}$  のモデルを例に、 $\delta_o/B$  と  $c\theta \times \rho$  の関係を図5(b)に示す。図中の凡例は  $\rho$  の値を示す。 $\delta_o/B$  は  $\rho$  が大きくなるに従って上昇する傾向があるが、図5(a)のように  $c\theta \times \rho$  を横軸に用いると、 $\rho$  の異なるデータが同一の放物線上に分布する。

以上を総合すると、 $\delta_o/B$  は  $c\theta$  の2乗、 $B/t$  の4乗、 $\rho$  の2乗に比例する傾向がある。そこで、 $\delta_o/B$  とこれらの因子との関係を(1)式によって近似する。

$$\delta_o/B = 3 \times 10^{-4} \times (c\theta \times \rho \times (B/t)^2)^2 \quad (1)$$

以上、角形鋼管柱について  $\delta_o/B$  に対する影響因子を分析し、 $\delta_o/B$  と  $c\theta$  の関係を表す近似式を得ることができた。

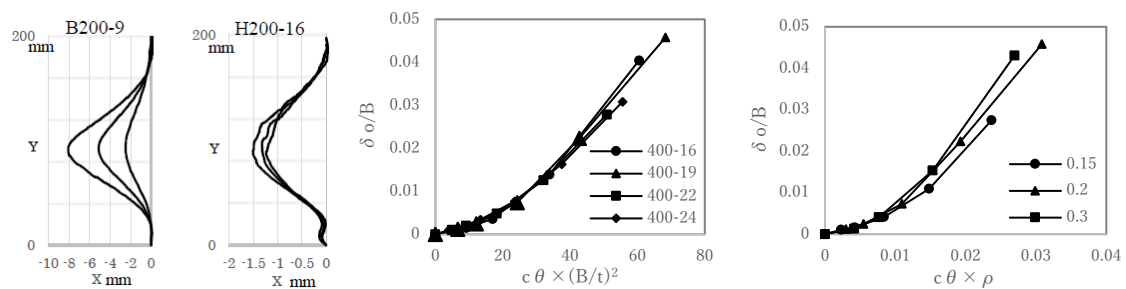


図4 局部座屈波形

(a)  $B=400\text{mm}$ ， $\rho=0.2$

(b)  $B=400\text{mm}$ ， $t=19\text{mm}$

図5 局部座屈波形の振幅と累積部材角の関係

##### (3) フランジ面外変形から判定される残余変形性能と既往の判定方法との比較

部材実験に用いた試験体のうち、軸力を与えた角形鋼管を柱  $B$ 、軸力を与えた H 形断面を柱  $H$ 、軸力を与えなかった H 形断面を梁  $H$  として分類する。 $\delta_o$  と負側骨格曲線における累積塑性変形倍率  $s\eta$  の関係についてグループ毎に包絡線を求める。そして  $\delta_o$  が検知された時点で、過去の履歴によって生じた累積塑性変形倍率を包絡線から読み取り  $s\eta_d$  とする。一方、載荷開始時から  $M$  最大時までの骨格曲線累積塑性変形倍率についてグループ毎に平均値を求め、得られた値を表1の1列目に示す。これらの値から  $s\eta_d$  を控除した値を残余累積塑性変形倍率  $s\eta_R$  とする。表1に  $\delta_o=0.3, 1, 2, 3\text{mm}$  が確認された時点の  $s\eta_R$  をグループ毎に示す。

建築基準法では、幅厚比によって柱・梁の塑性変形性能を判別し、部材種別（FA, FB, FC）を定めている。ここで、文献 2), 3) の手法に基づき、部材種別に応じた必要塑性変形能力を求め、得られた必要塑性変形能力と  $s\eta_R$  を比較し、被災後の塑性変形能力に基づいて部材種別を判定した結果を表 1 中に記載する。

一方、被災度判定基準<sup>1)</sup>では構造骨組の被災度区分 Is～IIIs は耐力劣化が進んでいない段階として分類されており、損傷がこの区分に留まった柱・梁は、耐力・塑性変形性能の低下を考慮して耐震性能の再評価を行い、残余性能が要求性能を上回れば構造骨組の補修をせずに復旧できるとされている。本研究の柱 B、柱 H、梁 H について、目視や触感で局部座屈を検知することが困難な「 $\delta_o=0.3\text{mm}$ 」は被災度区分 IIs と判定し、「 $\delta_o=1\text{mm}$ 」～「 $\delta_o=3\text{mm}$ 」は局部座屈小に該当するものとして IIIs と判定する。表 1 中の  $\delta_o$  が生じた部材について、被災度判定基準に従って部材種別を判定した結果を表中に示す。 $s\eta_R$  に基づいて判定した部材種別と比較すると、柱 H の判定結果は概ね一致するが、柱 B では被災後の塑性変形能力を過大評価し、梁 H では過小評価する傾向が見られる。

以上のように、被災度判定基準による残余変形性能及び部材種別の判定方法は、部材の特性（柱・梁の別、断面形状）を考慮せずに定められているため、実験的に得られた残余変形性能と整合しておらず、改善の余地があることが分かった。

表 1 部材の残余変形性能と部材種別の判定

$\delta_o$	柱 B		柱 H		梁 H		被災度判定基準	
	$s\eta_R$	種別	$s\eta_R$	種別	$s\eta_R$	種別	被災度	種別
無損傷	3.3	FA	7.8	FA	12.0	FA	-	FA
0.3mm	0.6	FC	6.7	FB	11.2	FA	IIs	FB
1mm	0	FD	4.0	FC	9.5	FA	IIIs	FC
2mm	0	FD	2.4	FC	5.4	FC	IIIs	FC
3mm	0	FD	1.0	FC	3.3	FC	IIIs	FC

参考文献：

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2015
- 2) 加藤勉：閉断面部材の局部座屈と変形能力，日本建築学会構造系論文報告集，No.378，pp.27-36，1987.8
- 3) 加藤勉，中尾雅躬：局部座屈に支配される H 形断面鋼部材の耐力と変形能力，日本建築学会構造系論文集，No.458，pp.127-136，1994.4

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山崎謙太, 加藤淳一朗, 東原佳佑, 松本由香	4. 巻 構造
2. 論文標題 局部座屈が生じる鋼構造部材の面外変形と損傷度に関する研究, その1: 局部座屈による面外変形の計測方法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 997-998
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加藤淳一朗, 山崎謙太, 東原佳佑, 松本由香	4. 巻 構造
2. 論文標題 局部座屈が生じる鋼構造部材の面外変形と損傷度に関する研究, その2: 部材の塑性変形と面外変形の関係	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 999-1000
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 加藤淳一朗, 山崎謙太, 小林遼壱, 松本由香	4. 巻 構造
2. 論文標題 被災した鋼部材の局部座屈波形計測に基づく残余耐震性能の推定, その1: 繰返し載荷試験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 1139-1140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小林遼壱, 山崎謙太, 加藤淳一朗, 松本由香	4. 巻 構造
2. 論文標題 被災した鋼部材の局部座屈波形計測に基づく残余耐震性能の推定, その2: フランジの表面形状	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 1141-1142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山崎謙太, 小林遼彦, 加藤淳一郎, 松本由香	4. 巻 構造
2. 論文標題 被災した鋼部材の局部座屈波形計測に基づく残余耐震性能の推定, その3: 面外変形と累積塑性変形倍率の関係	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 1143-1144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 山崎謙太
2. 発表標題 局部座屈が生じる鋼構造部材の面外変形と損傷度に関する研究, その1: 局部座屈による面外変形の計測方法
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤淳一郎
2. 発表標題 局部座屈が生じる鋼構造部材の面外変形と損傷度に関する研究, その2: 部材の塑性変形と面外変形の関係
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤淳一郎
2. 発表標題 被災した鋼部材の局部座屈波形計測に基づく残余耐震性能の推定, その1: 繰返し載荷試験
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林遼吾
2. 発表標題 被災した鋼部材の局部座屈波形計測に基づく残余耐震性能の推定，その2：フランジの表面形状
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎謙太
2. 発表標題 被災した鋼部材の局部座屈波形計測に基づく残余耐震性能の推定，その3：面外変形と累積塑性変形倍率の関係
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019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