

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420569

研究課題名（和文）損傷に関わる視覚情報に基づいた鋼部材の簡易損傷評価法

研究課題名（英文）Quick inspection method for steel structures based on the visible damage

研究代表者

吉敷 祥一（Kishiki, Shoichi）

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：00447525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、都市のレジリエンスを高めるため、個々の建築物が被った損傷の程度を“初動調査時にスクリーニングする”ため、以下に示す2つの簡便な損傷評価手法を構築した。(1)カセットプレートを含む単一山形鋼ブレースにおける面外変形、両脚の開きに基づく構造骨組あるいは部材の損傷評価法を構築した。また、(2)鋼柱における局部座屈変形を定量的なデータとして整理し、局部座屈変形の大きさに基づく部材の残存耐力評価法を構築した。

研究成果の概要（英文）：Firstly, cyclic loading tests focusing on the residual out-of-plane deformation and the leg opening of single angle brace were conducted. The major findings obtained from the test are summarized as follows: (1) the maximum story drift angle and the maximum elongation of the brace can be estimated by using the residual out-of-plane deformation; (2) cumulative damage due to cyclic loading can be estimated by the length of the leg opening of its cross section. And, cyclic loading tests focusing on the residual out-of-plane deformation in the local buckling region of steel column were conducted. The major findings obtained from the test are summarized as follows: (1) the out-of-plane deformation in local buckling region was strongly related with the residual strength deteriorated due to the local buckling; (2) the rotation angle of column after deterioration is able to be converted to the out-of-plane deformation by a 3-hinge deformation model of the local buckling.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：被災度区分判定 損傷評価 鋼構造 鋼柱 ブレース 山形鋼 残留変形 繰り返し載荷実験

1. 研究開始当初の背景

建築基準法における耐震設計の目標は、倒壊防止による人命保護であり、大地震時には構造骨組を塑性化させ、建築物に損傷が及ぶことを許容している。したがって、都市部が大地震に襲われれば、すでに住居としてだけでなく経済活動の場としても重要な役割を担っている建築物の多くに損傷が及び、個々の建築物の損傷が都市機能を低下させ、結果として甚大な経済損失を引き起こすことが予想される。このような都市の地震災害を最小限に抑えるためには震災後に個々の建築物の機能を如何に早く復旧させられるかが重要であるが、それ以前に個々の建築物がどの程度の損傷を受けているかを迅速に把握し、その損傷に応じた応急復旧を計画することも重要である。米国をはじめ、地震国が防災・減災の目標として掲げている「地震災害に対してレジリエンスを高めた都市」を実現するためには、免制振といった高性能な耐震技術の開発だけでなく、「個々の建築物が被った損傷の迅速なスクリーニング技術」の開発も重要課題の一つであると言える。

2011年に発生した東日本大震災では震動被害が広範囲に及んだ上に、津波による沿岸域の壊滅的な被害と原子力発電所における放射性物質の放出が重なり、避難所や防災拠点となりうる建築物をできるだけ多く、迅速に確保することが求められた。すなわち、“継続使用”に耐えうる建築物の確保が必要とされたが、その際に建築物が被った損傷の程度を評価する被災度区分判定の良否が復旧活動に大きく影響した。特に屋内運動場などの鋼構造建築物では損傷指標が不明瞭であったため、使用可否の判断や応急復旧・補修計画への展開（優先順位の決定）において技術者や自治体の混乱を招き、復旧活動の遅延を引き起こした。この原因について分析してみると、鋼部材では地震時に観察される塗装の剥離、座屈変形、周辺コンクリートのひび割れといった損傷に関わる情報が、実際に鋼部材が被った損傷の程度あるいは残存耐震性能と直接的に結び付けられていないためであることが分かった。すなわち、都市機能の早期復旧には、部材としての損傷を、鋼部材において観察される損傷状況から判断する指標が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、都市のレジリエンスを高めるため、個々の建築物が被った損傷の程度を“初動調査時にスクリーニングする”ための簡便な損傷評価手法を構築する。具体的には、

- (1) ガセットプレートを含む単一山形鋼ブレースにおける面外変形、両脚の開きを定量的なデータとして整理し、これらを用いた構造骨組あるいは部材の損傷評価法を構築する。
- (2) 鋼柱における局部座屈変形を定量的なデータとして整理し、これらを用いた部材の残

存耐力評価法を構築する。

3. 研究の方法

(1) 単一山形鋼ブレースの実験

まず、単一山形鋼ブレースの実験セットアップを図1に示す。試験体は両端をガセットプレートに高力ボルト摩擦接合した単一山形鋼ブレースである。材長は4.0mと2.0mの2種類、断面にはL65x6、L75x6、L75x12、L90x7、L100x7(SS400)の6種類を用いた。これに加え、載荷振幅を $\pm 0.5 \sim \pm 2.0\%$ の範囲で7種類変化させ、計33体の試験体を用意した。

実験は、試験体のガセットプレートの一端を反力治具に固定し、他端に接続したアクチュエータにより軸方向に強制変位を与えることで行った。載荷は、山形鋼ブレースの断面が完全に破断するまで同一振幅を繰り返し与えた。

実験中は、アクチュエータに内蔵したロードセルにより軸力を計測し、試験体のガセットプレート両端における水平変位の差分から軸変形を得る。なお、軸力と軸変形はともに引張側を正、圧縮側を負とする。これに加え、損傷指標となりうる材中央部の面外変形と両脚の開きを対象とし、載荷中を含む連続的なデータの計測を計画した。さらに載荷サイクルの合間には実測も行った。

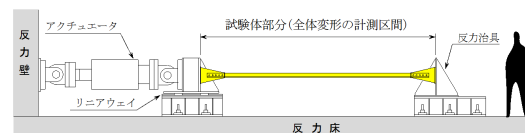


図1 プレース実験セットアップ

(2) 鋼柱の実験

次いで、鋼柱の実験セットアップを図2に示す。試験体は材長1.46mの片持ち柱であり、柱断面、軸力比をパラメータとする計9体を用意した。断面形状は箱形とH形であり、箱形断面の角形鋼管柱は冷間成形材(BCR295)の3断面を、H形鋼柱は溶接組立材(SS400)の2断面を用意した。角形鋼管柱については、種別FCの200x6を基準とし、同幅で幅厚比が種別FAに分類される200x9と、異幅で幅厚比の等しい300x9を用意した。一方、H形鋼柱は、ウェブ幅厚比をほぼ等しくしてフランジ幅厚比を種別FC、FBとしたH200x180x6x6、H200x200x6x9の2断面を用意した。軸力比は、作用軸力を材料試験結果と公称断面に基づく降伏軸力比で除した値とし、0.15、0.30程度の2種類とした。

実験は、自己釣合型反力フレームに試験体の柱脚部を固定し、柱頭部に水平と鉛直の2台の油圧ジャッキを接続して構成する。なお、試験体の上部は載荷治具との接続治具とし、柱サイズ毎に共通で用いる。載荷は、鉛直ジャッキにより繰り返し変形を与えることで行った。なお、軸力については試験体や治具の変形に伴う幾何学的な変化に対しても、柱脚における軸力が一定値を保つように制御している。

実験中は、油圧ジャッキに取り付けたロードセルにより荷重を計測し、柱脚部に作用する曲げモーメント、軸力を算出する。また、損傷指標となりうる局部座屈変形に着目し、これを金属製直尺により実測するとともに、変位計による連続的なデータの計測も計画した。実測は、最大変形時および残留変形ゼロ時に行った。

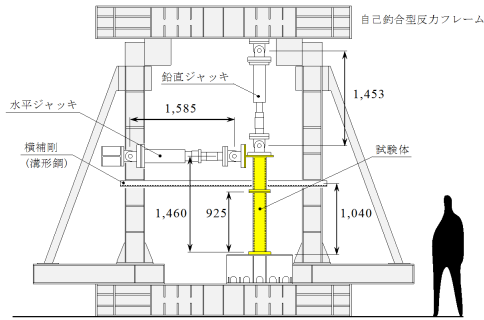


図2 鋼柱実験セットアップ

4. 研究成果

(1) 単一山形鋼ブレースによる損傷評価法

実験より得られた面外たわみの変位ゼロ時点での残留値（残留たわみ）と、そのブレースが経験した引張側の最大塑性ひずみの関係を図3に示す。ブレースが引っ張られ、塑性伸びが生じ、その後元の位置に戻ろうとすると圧縮変形を要するため、結果として面外たわみが生じる。ここでブレースを材長 L_b の両端ピン部材、たわみ曲線をsin波形とし、引張変形時に生じた塑性ひずみを ε_p とすれば、残留する面外たわみ $out\Delta_{res}$ は次式によって表せる。

$$\frac{out\Delta_{res}}{L_b} = \frac{2}{\pi} \sqrt{(1 + \varepsilon_p)} \cdot \varepsilon_p \quad \dots (1)$$

山形鋼ブレースが経験した最大変形に応じて残留たわみが大きくなっており、図3中においてもその様子が確認できる。本実験結果は、既往のターンバックルブレースの実験結果（×）に比べてやや下方にあるが、これは山形断面では面外変形とともにねじれが生じ、突出脚先端を計測点としたことによる誤差が表れているためである。(1)式は塑性変形に応じた残留たわみの増加傾向をよく捉えており、上述した山形鋼のねじれを含むと(1)式の残留たわみを80%とした評価値とよく対応していることが分かる。

一方、構造骨組の層間変形は、ブレースに生じる最大軸ひずみの約2倍程度となる。したがって、地震後の残留変形が小さい構造骨組に対しては、X字形配置された1対のブレースのいずれかが大きい方の残留たわみを実測すれば、図3を用いて構造骨組の経験した最大層間変形角を推定できる。例えば、残留たわみが材長の2.5%以下であれば、経験した層間変形角は許容応力度計算において想定される1/200rad.以下であったと推定でき、当該建築物の継続使用を判断する一つの判

断材料となる。

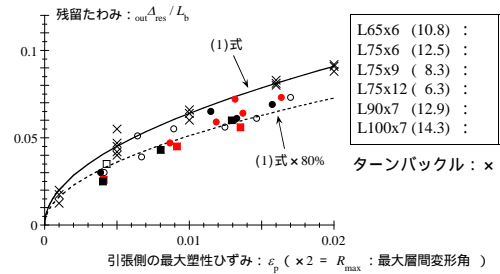


図3 残留たわみと最大塑性ひずみの関係

(2) 鋼柱による損傷評価法

実験より得られた残存耐力と局部座屈変形の関係について、試験体は200x6、軸力比0.15と0.30の結果を一例として図4に示す。縦軸は残存耐力 M_d （局部座屈変形を実測した際の劣化後耐力）を全塑性曲げモーメント M_{pc} で除した値であり、横軸は局部座屈変形 e を鋼管幅 B で除した値である。いずれの試験体においても、図に例示したように局部座屈変形の進展に伴い、残存耐力が低下しており、局部座屈の進行が板面外の変形を伴っていることが確認できた。また、同一断面で軸力比が大きいほど、同一軸力下では幅厚比が大きいほど、同じ局部座屈変形であっても残存耐力が低いことも分かった。

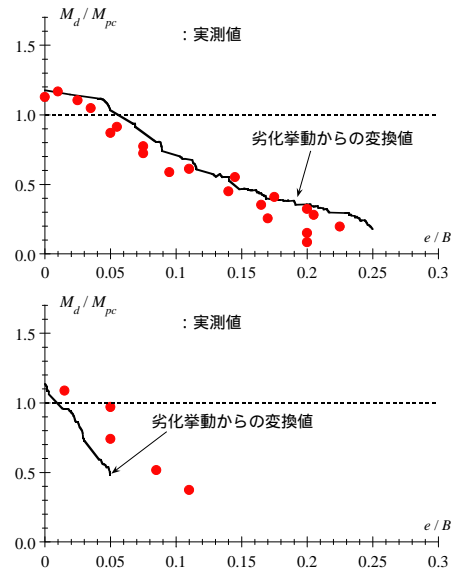


図4 局部座屈変形の実測値、および耐力劣化曲線から局部座屈変形との比較（上：軸力比0.15、下：軸力比0.30）

ここで、耐力劣化後における部材角と局部座屈変形を関係付ける力学モデルを提案し、その妥当性を検討する。耐力劣化後における柱の部材角 θ_B と局部座屈変形 e の進行を図5のように仮定する。すなわち、局部座屈領域における曲げ圧縮側のフランジ要素は、材長の変化がないまま、3ヒンジを形成して折れ曲がるものとする。柱せいを D 、柱フランジ厚を t_c 、せん断スパンを L 、局部座屈領域の長さを h_B とすれば、局部座屈変形を柱の部材角を用いて次式のように表せる。

$$e = \sqrt{\left(\frac{h_B}{2}\right)^2 - \left(\frac{h_B}{2} - \frac{\theta_B \cdot (D - t_c) \cdot L}{2L - h_B}\right)^2} \quad \dots (2)$$

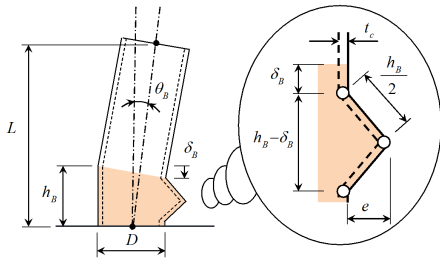


図5 局部座屈変形の3ヒンジモデル

実験より得られた拡張骨格曲線における耐力劣化後の履歴曲線を(2)式により $M_d - e$ 関係に変換した結果を、図4中に実線にて示す。いずれの試験体においても、(2)式による変換値は、実測値とよく対応していることが確認できた。したがって、軸力比、幅厚比、部材長に応じた耐力劣化後の履歴曲線が与えられれば、 $M_d - e$ 関係に変換でき、各種パラメータに対する残存耐力が評価できる。

例えば、耐力劣化挙動を含む部材レベルの履歴則として加藤・秋山モデルを用いれば、局部座屈変形に基づく残存耐力評価の推定図表を用意できる。これらの図表をあらかじめ用意しておけば、被災時に鋼柱に生じた局部座屈変形を実測し、図表に当てはめることにより、即座に残存耐力を推定できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

岩崎祐介、吉敷祥一、局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の簡易な損傷評価法と補修、鋼構造年次論文報告集、査読有、第23巻、pp.521-526、2015.11

吉敷祥一、巽信彦、単一山形鋼の残留たわみと両脚の開きに基づく損傷評価 - “見える損傷”の定量化に基づく鋼構造骨組の即時損傷評価法 その2 -、日本建築学会構造系論文集、査読有、第81巻、pp.143-153、2016.1

DOI : <http://doi.org/10.3130/aijs81.143>
巽 信彦、吉敷祥一、長谷川隆、山田 哲、接合部詳細の違いに着目した2層1スパン実大ブレース架構の実験、日本建築学会構造系論文集、査読有、第81巻、pp.779-789、2016.4

DOI : <http://doi.org/10.3130/aijs81.779>
岩崎祐介、吉敷祥一、残留局部座屈変形に基づく鋼柱の簡易な損傷評価法、鋼構造年次論文報告集、査読有、第24巻、pp.292-296、2016.11

吉敷祥一、岩崎祐介、局部座屈変形に基づく鋼柱の残存耐力評価 - “見える損傷”の定量化に基づく鋼構造骨組の即時損傷評価法 その3 -、日本建築学会構造系論文集、査読有、第82巻 第735号、pp.735-743、

2017.5

DOI : <http://doi.org/10.3130/aijs81.735>
巽 信彦、吉敷祥一、接合形式の異なる山形鋼ブレースの接合部耐力と繰り返し変形性能、日本建築学会構造系論文集、査読有、第82巻 第736号、pp.909-919、2017.6
DOI : <http://doi.org/10.3130/aijs82.909>

〔学会発表〕(計 7 件)

岩崎祐介、吉敷祥一、局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の損傷評価と補修、日本建築学会近畿支部研究発表会、大阪工業技術専門学校(大阪府・大阪市)、2015.6.28
吉敷祥一、岩崎祐介、局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の損傷評価と補修 その1 実験計画と損傷評価、日本建築学会大会学術講演、東海大学(神奈川県・平塚市)、2015.9.5

岩崎祐介、吉敷祥一、局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の損傷評価と補修 その2 補修試験体の結果、日本建築学会大会学術講演、東海大学(神奈川県・平塚市)、2015.9.5

Yusuke IWASAKI、Shoichi KISHIKI、Seismic repair to steel beams with strength degradation due to the local buckling、The 8th international symposium on steel structures、済州島(韓国)、2015.11.5

岩崎祐介、吉敷祥一、鋼柱の簡易な損傷評価法と角形鋼管柱の被災後補修、日本建築学会近畿支部研究発表会、大阪工業技術専門学校(大阪府・大阪市)、2016.6.25-26

岩崎祐介、岩崎桃子、吉敷祥一、局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の損傷評価と補修 その3 角形鋼管柱の補修に関する追加実験、日本建築学会大会学術講演、福岡大学(福岡県・福岡市)、2016.8.24-26

岩崎桃子、岩崎祐介、吉敷祥一、局部座屈により耐力劣化した角形鋼管柱の損傷評価と補修 その4 H形鋼柱の補修、日本建築学会大会学術講演、福岡大学(福岡県・福岡市)、2016.8.24-26

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉敷 祥一 (KISHIKI, Shoichi)
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号 : 00447525