

平成 30 年 5 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18150

研究課題名(和文)3次元地震動を受ける鋼構造建築の耐震安全余裕度の解明と残存耐震性能評価法の高度化

研究課題名(英文)Evaluation of safety-margin and residual seismic performance of steel frames subjected to 3D earthquake ground motions

研究代表者

石田 孝徳 (Ishida, Takanori)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：80746339

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、まず、中小規模の鋼構造建築の柱脚形式として多く用いられる露出型柱脚を対象に、これまでほとんど行われてこなかった3次元繰り返し載荷実験を実施するとともに、3次元挙動を追跡する解析モデルを構築した。また、平面骨組による検討ではあるが、鋼部材の劣化挙動を反映した鋼構造骨組の弾塑性応答解析を行い、露出型柱脚の弾塑性挙動が骨組の損傷分布に及ぼす影響を明らかにした。さらに、前震や余震により複数回強震を受ける場合に、現行の耐震設計法で設計された建物にどのように損傷が累積し、最終的に倒壊に至るのかについて検討した。

研究成果の概要(英文)：Firstly, a series of cyclic loading tests of exposed column base under tri-directional loads was conducted and the analytical model to simulate 3D behavior of exposed column base was validated based on comparing with the test results. And, the influence of inelastic behavior of exposed column bases to damage distribution of steel frames was evaluated through a series of earthquake response analyses of steel moment-resisting frames (MRFs) using plane frames. Moreover, since buildings may be subjected to one or more severe foreshocks and/or aftershocks within a short period, this study performed a series of earthquake response analysis of MRFs subjected to multiple strong earthquake ground motions and presented how the damage to structural components accumulate.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鉄骨構造 3次元繰り返し載荷実験 露出型柱脚 地震応答解析 損傷分布 倒壊挙動

1. 研究開始当初の背景

比較的靱性に富んだ鋼構造建築が非常に大きな地震入力を受けて倒壊するのは、重力による荷重効果である P- 効果と構成部材が最大耐力に至った後に耐力劣化に転じることで層剛性が負となり、これに伴い大きな応答変位が相乗的に発生し、最終的に柱が復元力を喪失して自重を支持できなくなることによる。鋼構造建築を対象とした地震荷重下における倒壊挙動に関する研究はこれまでも多く行われているが、これらの研究で用いられている鋼部材の履歴モデルは劣化挙動が反映されていないか、反映されていたとしても実際の部材の挙動と対応づけられていないものが多く、現実的な結果が得られているのか曖昧である。また、鋼部材の現実的な劣化挙動を反映した鋼構造建築の倒壊挙動に関する数少ない研究においても、平面骨組を対象とした検討であるため、建物が倒壊に至るまでの 3 次元挙動は明らかとなっていない。このような背景のなか実施された実大 4 層建鉄骨造建物の完全崩壊実験では、部材の履歴挙動なども含め鋼構造建築が倒壊に至るまでの挙動に関する詳細なデータが得られた。しかし、1 体の実験結果に関する整理が終わっただけであり、現行の耐震設計で設計された一般的な鋼構造建築が有する耐震安全余裕度は明らかとなっていない。

また、鋼構造建築の耐震性能評価や耐震性能向上に関する研究はこれまで多く行われてきたのに対し、大規模な地震を受けて被災した鋼構造建築の残存耐震性能に関する研究は極めて少なく、「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」において、被災後の鋼構造建築の残存耐震性能に関する資料がわずかに示されているだけである。東海・東南海・南海地震や首都直下地震などの巨大地震の発生による甚大な地震被害が危惧されるなか、鋼構造建築の耐震安全余裕度を解明することと同時に、被災した鋼構造建築の残存耐震性能を明らかにすることは、適切な復旧作業に繋げていくために極めて重要であり、かつ急務である。これらの課題を克服するためには、鋼部材の現実的な劣化挙動を反映した鋼構造骨組の弾塑性応答解析を行い、骨組が多少損傷を受ける程度から倒壊に至るまでの挙動を解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、我が国の鋼構造建築の大部分を占める中小規模の鋼構造建築を対象に、現行の耐震設計で設計された鋼構造建築が有する耐震安全余裕度を解明すること及び残存耐震性能評価法の高度化を図ることである。そのためには、3 次元外力を受ける部材や接合部の履歴挙動を再現可能なモデルを構築し、これを実装した鋼構造立体骨組の弾塑性応答解析を行う必要がある。本研究では、まず、中小規模の鋼構造建築の柱脚形

式として多く用いられる露出型柱脚を対象に、これまでほとんど行われてこなかった 3 次元繰返し載荷実験を実施するとともに、3 次元挙動を追跡する解析モデルを構築する。また、露出型柱脚の弾塑性挙動が骨組の耐震性能に及ぼす影響を検討する。さらに、前震や余震などにより、一度の強震だけでなく複数回の強震を受ける鋼構造建築を想定した応答解析を行い、骨組が多少塑性化する程度から倒壊に至るまでの各損傷レベルについて、個々の部材・接合部の損傷状況と骨組全体としての損傷状況の関係を検討する。

3. 研究の方法

(1) 3 次元外力を受ける露出型柱脚の繰返し載荷実験

露出型柱脚の実験セットアップを図 1 に示す。試験体は鋼柱と RC 柱型を 8 本の建築構造用転造両ねじアンカーボルト (ABR400) で接合した露出型柱脚であり、アンカーボルトが降伏するように設計した。水平 2 方向の載荷履歴は、図 2 に示す楕円の組み合わせとした。楕円の長軸における振幅は、鋼柱の部材角で制御し、1 セットごとに $1/100\text{rad}$ ずつ漸増させた。軸力は、一定または変動とした 2 パターンとした。一定軸力に関しては、柱の降伏軸力 N_y に対する作用軸力 N の比 N/N_y を 0.16 とした圧縮軸力を作用させた。変動軸力に関しては、 N/N_y を 0.16 とした初期軸力を与え、初期軸力に対する軸力の変動幅を N/N_y で ± 0.08 とした。軸力の変動パターンについては、図 3 に示すように、軸力を y 軸方向における柱の変形角 R_y に比例するように変動させることとした。

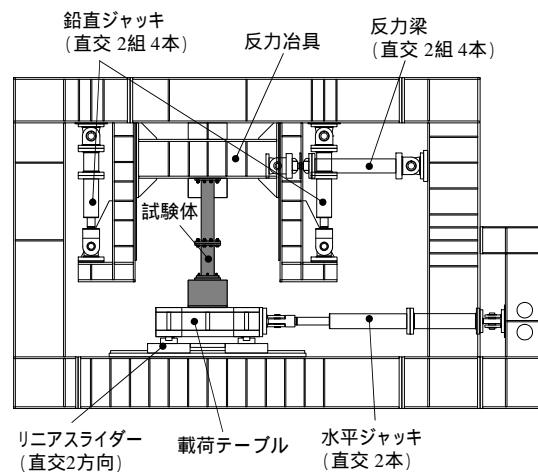


図 1 実験セットアップ

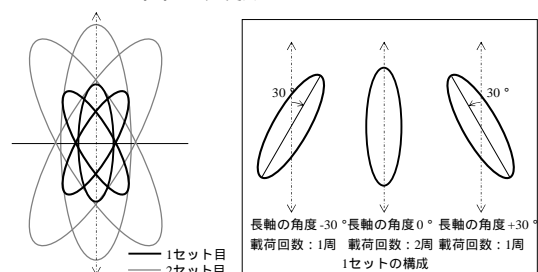


図 2 水平 2 方向の載荷履歴

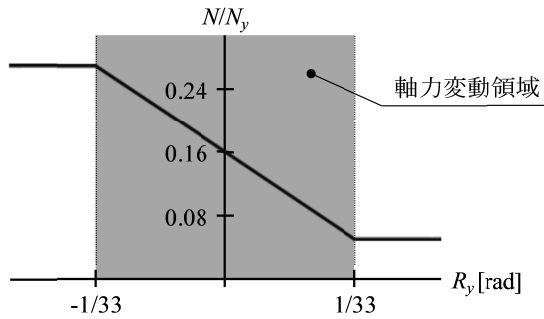


図3 軸力の変動パターン

(2) 露出型柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性応答解析

露出型柱脚の弾塑性挙動が骨組の損傷分布に及ぼす影響、および第1層の保有水平耐力の割増しによる第1層上部への損傷集中の低減効果について検討するため、鋼構造剛接骨組の地震応答解析を行った。解析骨組は、図4に示す、階高3.5m、スパン7m、各層の1スパンあたりの重量を400kNとした無限均等ラーメン骨組である。柱は箱形断面部材、梁はH形断面部材であり、柱梁接合部パネルについては直下の柱と同一断面である。また、一般性を持たせるため、3層ごとに柱の断面を同一としている。柱と梁の履歴モデルについては、図5(a)に示す、骨格曲線とバウシंगाー部、弾性除荷部から構成されるモデルを用いた。また、柱については局部座屈に伴う耐力劣化を考慮し、その履歴モデルについては、図5(b)に示す、拡張骨格曲線、耐力上昇部、除荷部から構成されるモデルを用いた。柱脚の復元力特性は図6に示すスリップ型のモデルとした。解析骨組に関するパラメータは、層数、柱及び梁の幅厚比、柱脚の全塑性曲げ耐力 $cbMp$ と柱の全塑性モーメント $cMpc$ との比 $cbMp/cMpc$ であり、柱脚ヒンジ型とした場合は第1層のベースシア係数 $C1$ の割増し量も変化させた。入力には、El Centro(NS)、Taft(NS)、八戸(EW)、JMA 神戸(NS)、2011年東北地方太平洋沖地震の仙台管区気象台記録 NS、EW 成分の6波を採用した。

(3) 複数回強震を受ける鋼構造骨組の弾塑性応答解析

1度の強震だけでなく、大きな前震・余震の発生によって複数回強震受ける場合に、現行の耐震設計法で設計された建物にどのように損傷が累積し、最終的に倒壊に至るのかを検討するため、鋼柱の耐力劣化を反映した複数回強震を受ける鋼構造剛接骨組の地震応答解析を行った。解析骨組、部材の復元力特性モデル、入力波の位相は、「(2) 露出型柱脚を有する鋼構造骨組の弾塑性応答解析」で用いたものと同じである。また、本解析では、柱と梁の幅厚比は部材種別 FA の制限値とした。柱脚は露出型柱脚であり、柱脚の全塑性曲げ耐力と柱の全塑性モーメントの比 $cbMp/cMpc$ は 1.3 とした。入力波につい

ては、入力加速度に係数を掛けて最大地動速度(PGV)を50、75あるいは100cm/sに基準化し、同一の地震動を最大5回まで繰り返し入力した。

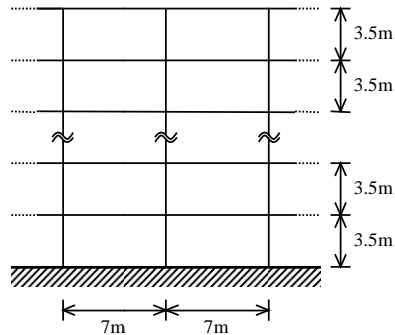
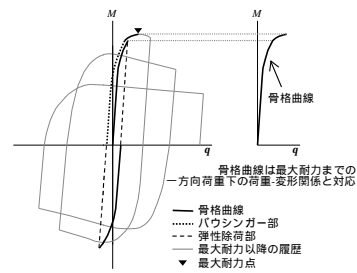
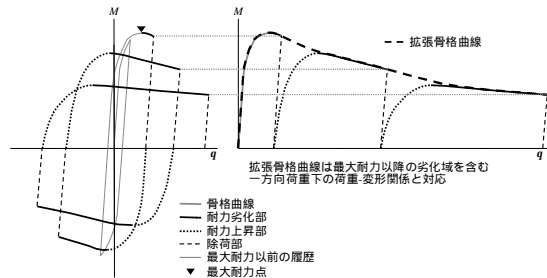


図4 解析骨組



(a) 最大耐力以前



(b) 最大耐力以降

図5 柱と梁の履歴モデル

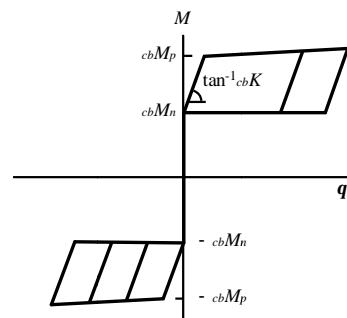


図6 柱脚の履歴モデル

4. 研究成果

(1) 3次元外力を受ける露出型柱脚の解析モデルの構築

柱脚の解析モデルを図7に示す。本解析モデルは、アンカーボルトの引張抵抗を表現する引張パネと、基礎コンクリートによる圧縮抵抗を表す圧縮パネから構成される。引張お

よび圧縮バネの履歴特性を図8に示す。変動軸力下で水平2方向外力を与えた場合を例に、実験結果と解析結果の柱脚の曲げモーメント-回転角関係の比較を図9に示す。本解析モデルは一定軸力の試験体および変動軸力の試験体ともに、各軸回りの履歴曲線を良好に追跡できることを確認した。

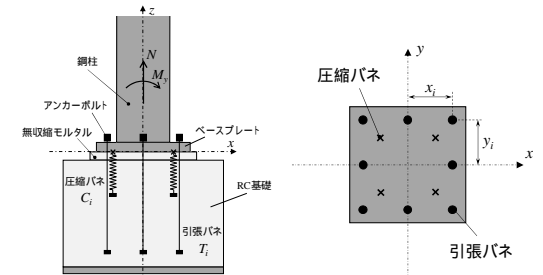


図7 解析モデル

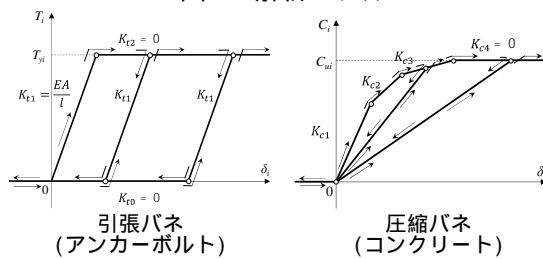


図8 履歴特性

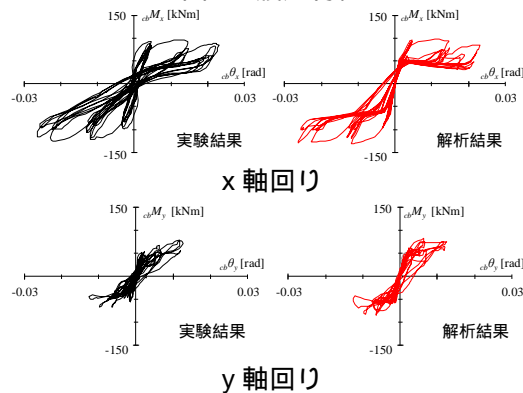


図9 実験結果と解析結果の比較

(2) 柱脚の弾塑性挙動が骨組の耐震性能に与える影響

ここでは $cbM_p/cM_{pc}=1.3$ を柱ヒンジ型、 0.7 を柱脚ヒンジ型として、柱梁の幅厚比が小さい骨組における損傷分布(骨組全体での塑性ひずみエネルギーに対する各部材の塑性ひずみエネルギーの比率)を図10に例示する。なお、図は最大地動速度を 50cm/s に基準化した入力地震動6ケースの平均値である。柱脚ヒンジ型では、露出型柱脚が塑性化してスリップ挙動を示すことにより、第1層柱の反曲点高さが下がり上部の曲げ応力が増加すること、また第1層下部でのエネルギー吸収量が低下することから、柱ヒンジ型と比較して第1層上部の梁の損傷が大きくなっていることが分かる。しかしながら、柱脚ヒンジ型としても第1層のベースシア係数を 0.05 割増すと、第1層上部梁の損傷は上層部の梁

に移行し、柱ヒンジ型とした骨組程度まで緩和することがわかった。

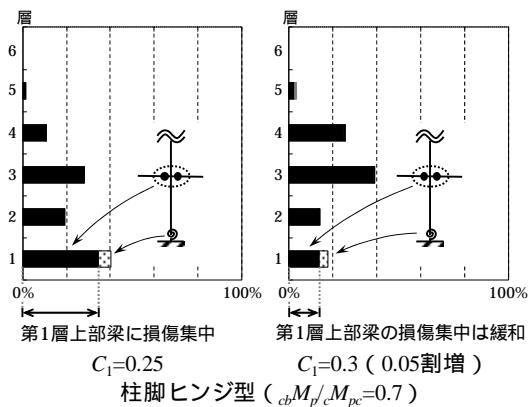
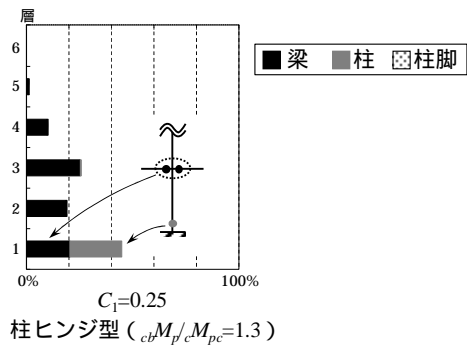


図10 損傷分布と保有水平耐力の割増しの効果

(3) 複数回強震を受ける鋼構造骨組の損傷評価

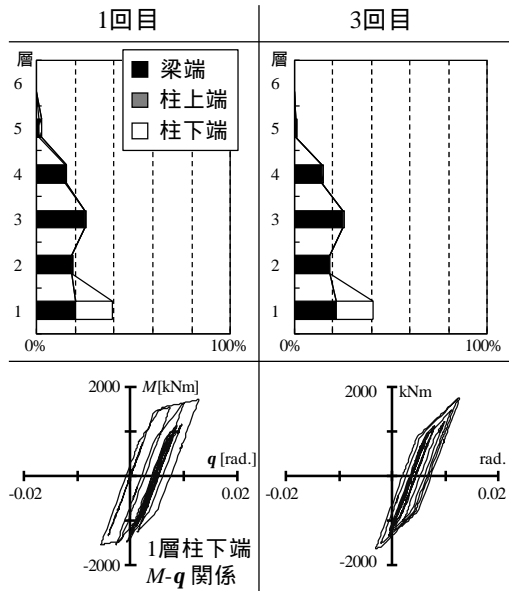
柱に耐力劣化が生じた場合と生じなかった場合について、各入力回の損傷分布(各入力回で吸収した、骨組全体での塑性ひずみエネルギーに対する各部材の塑性ひずみエネルギーの比率)と1層柱下端曲げモーメント-回転角関係を、それぞれ図11(a)、(b)に示す。

まず、柱に耐力劣化が生じなかった場合であるが、1回目と2回目以降の入力による1層柱下端の履歴挙動を比較すると、1回目の入力では骨格曲線での挙動が見られるのに対し、2回目以降の入力ではバウシंगा部における挙動が支配的であることがわかった。しかし、この挙動の違いが損傷分布に与える影響は小さく、1回目と2回目以降の入力における損傷分布には、ほとんど変化は見られなかった。

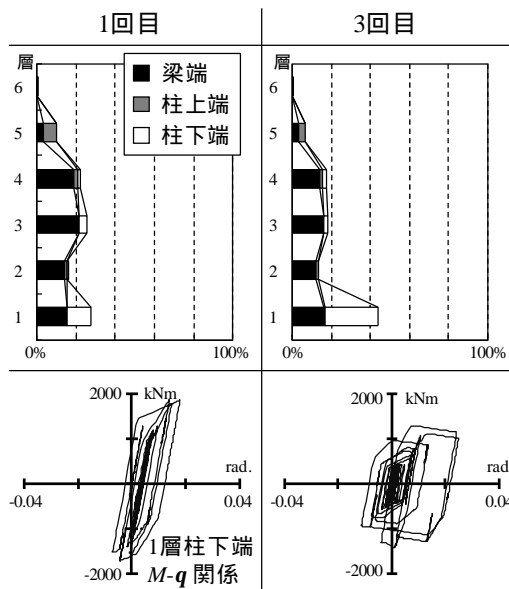
次に、柱に耐力劣化が生じた場合であるが、1回目の入力では、1層柱下端は最大耐力以前に留まっているが、2回目以降の入力において、1層柱下端に耐力劣化が生じた。3回目の入力では、1層柱下端の耐力劣化の進行に伴い、1層への損傷集中が見られた。その後の入力において、1層柱上端にも顕著に塑性化が見られ、1層への損傷分布がさらに大きくなり、最終的に、5回目の入力において、

1層柱上端に顕著な耐力劣化が生じて1層が層崩壊に至った。

以上より、鋼柱に耐力劣化が生じない場合では、各入力回における損傷分布はほぼ一定となるが、耐力劣化が生じると、その後の地震入力による耐力劣化の進行に伴って特定層に損傷集中し、最終的に層崩壊に至ることがわかった。



(a) 柱に耐力劣化が生じなかった場合
(6層骨組 神戸波 PGV=50cm/s)



(b) 柱に耐力劣化が生じた場合
(6層骨組 神戸波 PGV=100cm/s)

図 11 損傷分布と1層柱下端の履歴挙動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

石田孝徳、山田 哲、久保田航平、露出型柱脚を有する鋼構造剛接骨組の D_s 値再評価、日本建築学会構造系論文集、査

読有、第81巻、pp.357-367、2016、DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.81.357>
石田孝徳、Tenderan Randy、山田 哲、柱の局部座屈を考慮した複数回強震動を受ける剛接骨組の応答解析、鋼構造年次論文報告集、査読有、第25巻、pp.492-499、2017

〔学会発表〕(計9件)

石田孝徳、久保田航平、島田侑子、山田 哲：露出型柱脚を有する鋼構造剛接骨組の D_s 値再評価 その1 解析概要、日本建築学会大会学術講演、2015

久保田航平、石田孝徳、島田侑子、山田 哲：露出型柱脚を有する鋼構造剛接骨組の D_s 値再評価 その2 解析結果、日本建築学会大会学術講演、2015

高森亮人、石田孝徳、山田 哲：3方向変動荷重を受ける露出柱脚の繰返し載荷実験 その1 実験計画、日本建築学会大会学術講演、2017

石田孝徳、高森亮人、山田 哲：3方向変動荷重を受ける露出柱脚の繰返し載荷実験 その2 実験結果、日本建築学会大会学術講演、2017

Takanori Ishida、Satoshi Yamada、Evaluation of D_s Value of Steel Moment Resisting Frames with Exposed Column Bases、3rd Huixian International Forum on Earthquake Engineering for Young Researchers、2017

Akito Takamori、Takanori Ishida、Satoshi Yamada、Cyclic Loading Tests of Exposed Column Bases under Tri-directional Varying Loads、The 9th International Symposium on Steel Structures、2017

6. 研究組織

(1)研究代表者

石田 孝徳 (ISHIDA, Takanori)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：80746339