

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360223

研究課題名(和文) 鉄骨造建物の3次元倒壊挙動の解明と耐震安全余裕度の評価

研究課題名(英文) Evaluation of the safety-margin of steel building structure under seismic force based on the investigation of 3D collapse behavior

研究代表者

山田 哲 (Yamada, Satoshi)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授

研究者番号：60230455

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、大地震時に鉄骨造建物が倒壊に至るまでの3次元挙動を明らかにし、耐震設計における安全余裕度を明らかにすることである。そのためには、構成部材の現実的な挙動を反映した応答解析を行う必要があることから、主要部材であり耐震要素でもある柱と梁を対象に、地震時の現実的な条件を反映した実験を実施し、3次元応力下で部材が最大耐力に到達し、その後復元力を喪失するまでの挙動を把握した。そして、部材の挙動を反映した数値解析を行うための、解析プログラム作成に取り組んだ。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to investigate the three-dimensional collapse behavior of steel building structure under severe earthquake and make the safe margin of earthquake resistant design clear. For the evaluation, it is necessary to do the response analysis which reflected realistic behavior of constructional members. In order to evaluate the hysteretic behaviors of columns and beams, some series of three-dimensional cyclic loading test on RHS columns and a series of cyclic loading test on composite beams were conducted. Also, research team worked on development of an analytical program for three-dimensional collapse behavior of steel frames.

研究分野：建築構造・材料

キーワード：鉄骨構造 倒壊 実験 3次元挙動

1. 研究開始当初の背景

建物は3次元の形状を有し、地震力も3次元の外力として作用するが、一般的な建物の構造設計や耐震診断では建物は2次元の平面骨組として扱われ、最大耐力に至る以前の検討しかできていない。また高層建築などでは3次元弾塑性解析を活用した設計が行われるようになってきたが、用いられている履歴則は最大耐力以前の挙動しか扱っておらず、実際にどの程度の安全余裕度を有しているかは不明である。これは、バックデータである部材や接合部に関する実験研究が、多くの場合最大耐力までの構面内挙動の評価に留まっていること、最大耐力以降の大変形領域まで踏み込んだ研究についても構面内挙動しか扱っていない場合が多く、最大耐力以降の挙動まで含めた、部材・接合部の立体的な履歴挙動が評価できていないことによる。

一般的な建物が地震荷重下で倒壊に至るまでの挙動が評価できれば、個々の建物の耐震安全余裕度を定量的に評価できることになり、合理的な耐震設計・耐震補強を行う上で極めて有意義である。そのためには、3次元大変形繰り返し載荷実験に基づき、部材・接合部が復元力を喪失するまでの履歴モデルを構築すると共に、構築した履歴モデルを組み込んだ3次元応答解析プログラムを作成し、建物が倒壊に至るまでの挙動を解析する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目標は、鉄骨造建物が倒壊に至るまでの3次元挙動を明らかにし、現行の耐震設計における安全余裕度を明らかにすることである。建物が地震荷重下で倒壊に至るまでの3次元挙動を検討するためには、3次元弾塑性応答解析を行う必要があるが、倒壊に至るまでの挙動を解析するためには構成部材や接合部が最大耐力に至り劣化する大変形領域での3次元履歴挙動をモデル化しておく必要がある。本研究では、これまであまり行われていない鋼部材および接合部の3次元大変形繰り返し載荷実験を行い、3次元応力下で部材および接合部が最大耐力に到達し、その後復元力を喪失するまでの履歴モデルを構築する。併せて、構築した履歴モデルを組み込んだ3次元弾塑性応答解析プログラムを作成し応答解析を行うことで、鉄骨造建物が倒壊するまでの挙動を明らかにするとともに、耐震安全余裕度の評価を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

鉄骨造建物が倒壊するまでの挙動を明らかにするとともに、耐震安全余裕度の評価を行うためには、鋼部材と接合部について3次元応力下での履歴挙動をモデル化し、これらを組み込んだ骨組の応答解析を行う必要がある。

本研究では、大きな軸力のもとで水平2方

向に大振幅での強制変形を受ける柱と、重要な耐震要素で有りながら、応力集中箇所でも有り耐震性能を限界づける柱周りの接合部を対象にした3次元大変形繰り返し載荷実験を行い、実験結果に基づき履歴モデルを構築する。併せて、構築した履歴モデルを組み込んだ多層立体骨組の3次元弾塑性応答解析プログラムを作成し、解析により建物が地震荷重下で倒壊に至るまでの3次元挙動を明らかにするとともに、一般的な鉄骨造建物が有する耐震安全余裕度を評価する。

4. 研究成果

(1) 一定軸力とランダムな2方向水平外力を受ける鋼管柱の終局挙動

3次元応力下の鋼管柱の終局挙動に関する研究の第一段階として、一定軸力とランダムな2方向水平外力を受ける鋼管柱の大変形繰り返し載荷実験を行い、復元力を喪失するまでの履歴挙動について検討するとともに、履歴モデルを構築した。

・実験の概要

実験パラメーターは水平2方向の載荷履歴、幅厚比、降伏軸力比とした。このうち、水平2方向の載荷履歴については、水平2方向入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析結果に基づき、図1に示すような規則的な載荷履歴とランダムな載荷履歴を設定し、一般性のある結果を得るようにした。セットアップを図2に示す。載荷方法や計測計画等の詳細は雑誌論文1)による。実験結果(直交2方向の荷重-変形関係)を図3に例示する。いずれの試験体も、最大耐力の決定要因は局部座屈であった。

・解析の概要

解析モデルを図4に示す変動軸力の影響を考慮した解析にも適用可能な、塑性化領域の断面を複数の弾塑性軸バネに置き換えたMSモデルとし、弾塑性軸バネの履歴モデルを既報の1軸曲げの条件における局部座屈を伴う鋼管柱の劣化挙動のモデルに基づき構築した。履歴モデルの詳細は雑誌論文2)による。実験結果とMSモデルによる解析結果の比較を図3に併せて示す。局部座屈発生以降の劣化域に至るまで水平2方向の履歴曲線を良好に追跡できることを確認した。

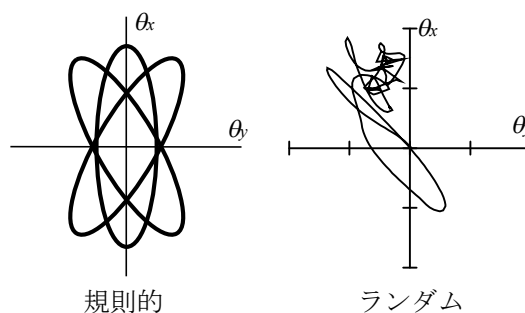
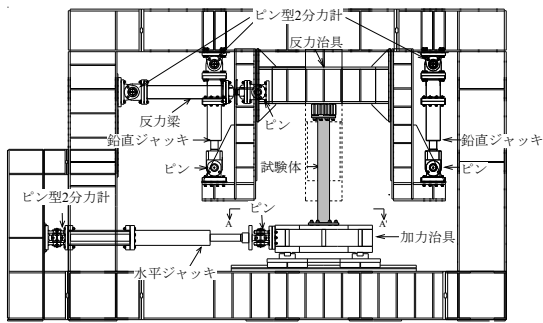


図1 水平2方向の載荷履歴



立面図
A-A'矢視図
図2 セットアップ

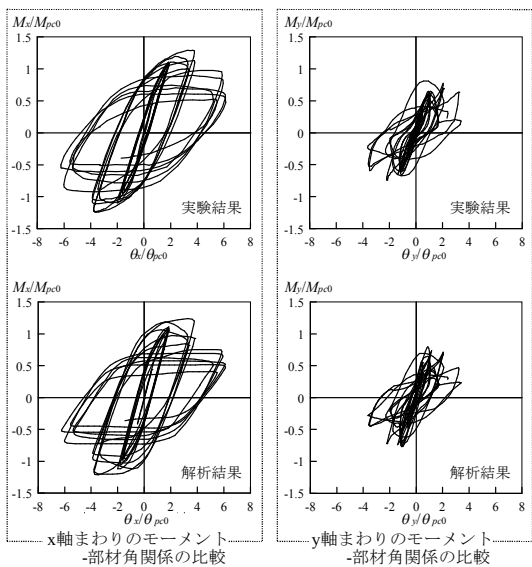


図3 実験結果と解析結果

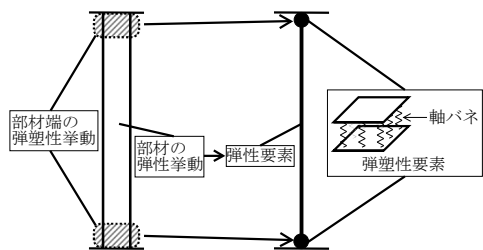


図4 MSモデル

(2) 変動軸力とランダムな2方向水平外力を受ける鋼管柱の終局挙動

変動軸力の条件における挙動に研究を展開し、転倒モーメントによる変動軸力を受ける多層骨組の下層部外柱を想定した、変動軸

力と水平2方向外力を受ける鋼管柱の大変形繰り返し載荷実験を行い、復元力を喪失するまでの履歴挙動について検討するとともに、雑誌論文2)の一定軸力の条件における履歴モデルを拡張し、変動軸力下での挙動の解析に対応できるようにした。

・実験の概要

実験パラメーターは軸力の変動幅、水平2方向の載荷履歴、幅厚比とした。また、軸力の変動パターンについては、水平2方向入力を受ける多質点せん断系の弾塑性応答解析結果に基づき、図5に示すように変動させることとした。セットアップや載荷方法は一定軸力下での載荷実験と同様である。実験結果(直交2方向の荷重-変形関係)を図6に例示する。

・解析の概要

解析モデルは雑誌論文2)の一定軸力の条件と同じMSモデルを用い、変動軸力下での挙動の解析に対応できるようにするため、一定軸力の条件におけるMSモデルの弾塑性軸バネの履歴モデルに修正を施した。詳細は雑誌論文3)による。解析結果を図6に併せて示す。いずれの試験体も、実験結果と解析結果は局部座屈発生以降の劣化域に至るまで対応していることを確認した。

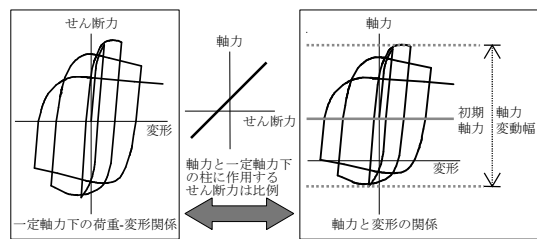


図5 軸力の変動パターン

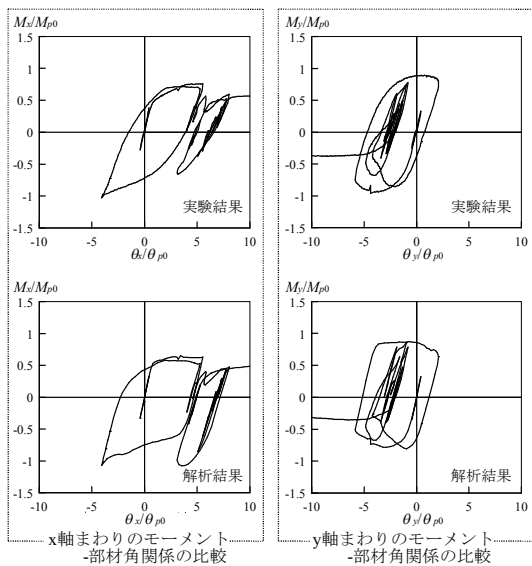


図6 実験結果と解析結果

(3) 床スラブの影響を考慮した梁端接合部の繰り返し挙動と変形性能

床スラブを設置した鉄骨梁と角形鋼管柱との接合部について、繰り返し載荷実験を実施した。試験体やセットアップは以下の通りである。

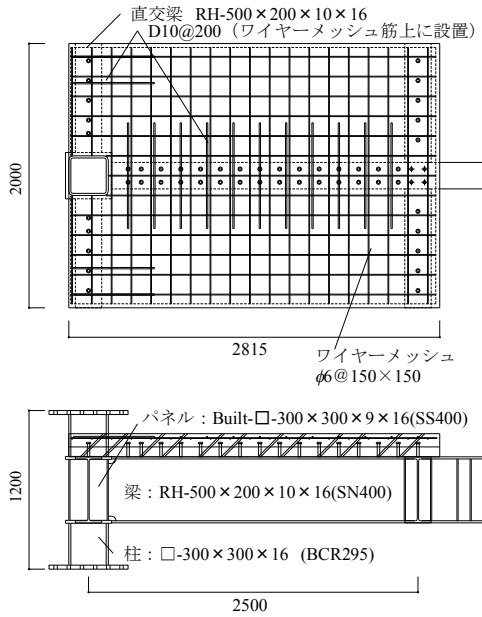


図7 試験体概要
表1 試験体一覧

試験体	梁(SN400)	パネル	$b_p M_p$ [kN·m]	$b_p \theta_p$ [rad]
A-09-200	RH-500×200×10×16	Built-□-300×300×9×16	599.5	0.0057
A-09-150	RH-500×150×10×16	(SS400)	485.2	0.0056
A-16-200	RH-500×200×10×16	□-300×300×16	548.8	0.0052
A-16-150	RH-500×150×10×16	(BCR295)	443.5	0.0051

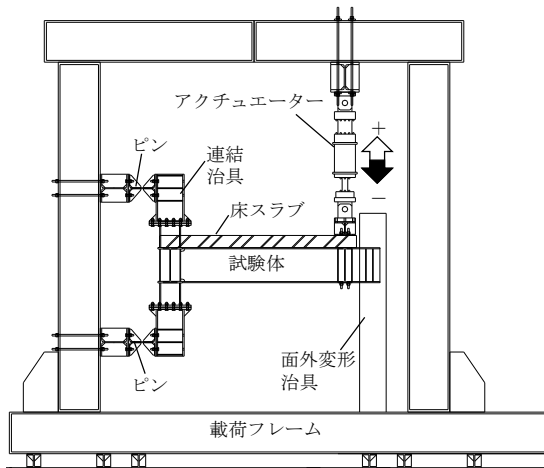


図8 セットアップ
表2 実験結果一覧

試験体		K_e [kN·m/rad]	M_{max} [kN·m]	θ_{max} [rad]	M_{wu-exp} [kN·m]	γ_{wu-exp}
A-09-200	+	170590	1001.8	0.0262	141.5	0.56
	-	132480	862.2	0.0230	92.0	0.37
A-09-150	+	126052	877.3	0.0265	204.4	0.81
	-	73073	662.8	0.0261	90.7	0.36
A-16-200	+	196861	1136.9	0.0236	289.7	1.11
	-	118060	851.2	0.0201	155.1	0.60
A-16-150	+	118436	982.0	0.0257	286.4	1.10
	-	95783	711.8	0.0208	161.9	0.62

実験結果一覧および荷重変形関係を以下に示す。また塑性中立軸の位置を接合部近傍の歪計測値から算出すると、いずれの試験体もほぼ上フランジ内であった。実験値から求めた床スラブ付き鉄骨梁ウェブのモーメント効率と、純鉄骨梁におけるウェブのモーメント伝達効率の予測値を比較すると、前者の方が2倍程度大きい値だった。

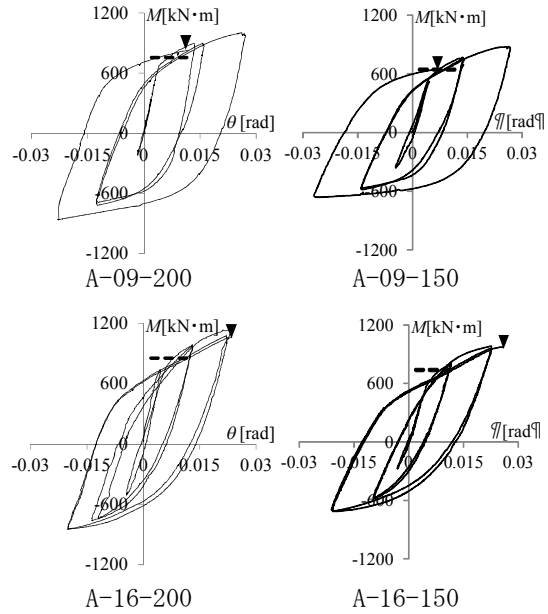


図9 モーメントー回転角関係

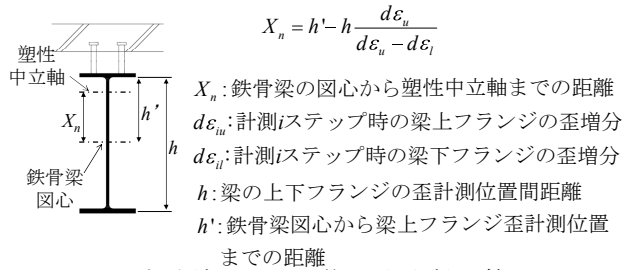


図10 実験結果による塑性中立軸の算出

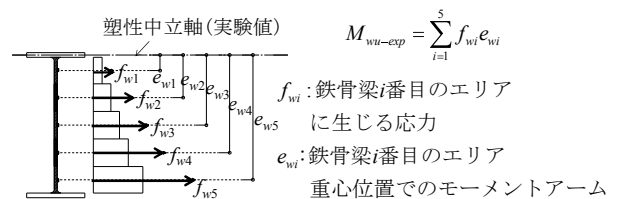


図11 ウェブの伝達モーメントの算出

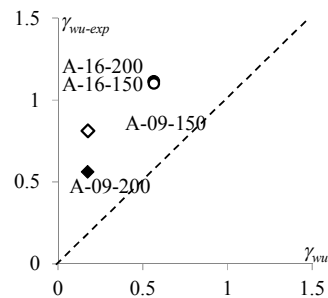


図12 ウェブのモーメント伝達効率の予測値と実験値

(4) 2 方向水平入力を受ける多層骨組の終局挙動

局部座屈に伴う耐力劣化を考慮した 2 方向水平入力を受ける層崩壊型多層骨組の弾塑性応答解析を行い、強震を受けた建物の残留変形角と残存耐震性能の関係を検討した。解析では、図 13 に示す MSS モデルを用いた。MSS モデルを構成するせん断バネの履歴モデルは、雑誌論文 1)、学会発表 1) の、一定軸力下で 2 方向水平外力を受ける鋼管柱の繰り返し載荷実験結果とのキャリブレーションに基づき設定した。残留変形角と骨格曲線での変形量(損傷)の関係を図 14 に例示する。層が最大耐力に到達し耐力劣化すると、最大耐力以前と比較して残留変形角の増加の度合いが大きくなる傾向がみられた。

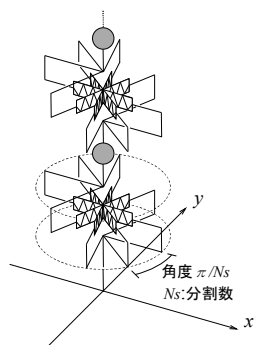


図 13 MSS モデル

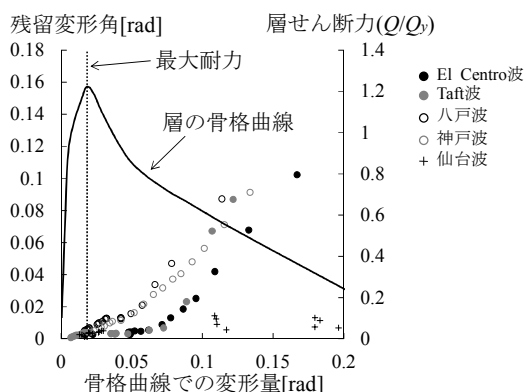


図 14 残留変形角と損傷(骨格曲線での変形量)の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) 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り返し載荷実験, 日本建築学会構造系論文集 第 78 巻 第 683 号, 査読有, pp. 203-212, 2013 年 1 月
- 2) 石田孝徳, 山田 哲, 島田侑子: 一定軸力下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集 第 78 巻 第 691 号, 査読有, pp. 1631-1640, 2013 年 9 月
- 3) 石田孝徳, 山田 哲, 島田侑子: 変動軸力

下で水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の履歴挙動の追跡, 日本建築学会構造系論文集 第 79 巻 第 699 号, 査読有, pp. 641-650, 2014 年 5 月

[学会発表] (計 13 件)

- 1) Takanori Ishida, Cyclic Loading Test on RHS Columns under Bi-Directional Horizontal Forces, 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering, 2013. 3. 1, Tokyo (Tokyo Tech)
- 2) 石田孝徳, 水平 2 方向外力を受ける角形鋼管柱の MSS モデルを用いた解析, 鋼構造シンポジウム, 2013. 11. 14, 東京 (お台場東京パレットタウン)
- 3) Takanori Ishida, Post Buckling and Deterioration Behavior of RHS Columns under Bi-directional Forces, 7th International Symposium on Steel Structures, 2013. 11. 7, Jeju, Korea
- 4) 石田孝徳, 層崩壊型多層骨組の残留変形角と残存耐震性能に関する基礎的検討, 鋼構造シンポジウム, 2014. 11. 13, 東京 (お台場東京パレットタウン)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 哲 (YAMADA Satoshi)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・教授

研究者番号: 6 0 2 3 0 4 5 5

(2) 研究分担者

吉敷 祥一 (KISHIKI Shoichi)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号: 0 0 4 4 7 5 2 5

島田 侑子 (SHIMADA Yuko)

千葉大学・工学研究科・助教

研究者番号: 9 0 5 8 6 5 5 4

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

石田 孝徳 (ISHIDA TAKANORI)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・助教

研究者番号: 8 0 7 4 6 3 3 9