

軸力と水平力を受ける鉄骨系柱材の弾塑性挙動に関する研究

平成5年

津田恵吾

目次

第1章 序論	1
§ 1. 1 研究目的	2
§ 1. 2 論文概要	4
第1章の参考文献	6
第2章 一定軸力と任意方向水平力を受けるH形鋼柱材の弾塑性挙動	7
§ 2. 1 序	8
§ 2. 2 実験	9
2.2.1 実験計画	9
2.2.2 試験体	9
2.2.3 加力装置および加力方法	11
2.2.4 測定方法	13
2.2.5 実験結果	13
§ 2. 3 解析	17
2.3.1 剛塑性解析	17
2.3.2 柱材の設計式	17
§ 2. 4 考察	20
2.4.1 弾塑性挙動	20
2.4.2 最大耐力	21
§ 2. 5 結論	25
第2章の参考文献	25
第3章 一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動	27
§ 3. 1 序	28
§ 3. 2 実験	30
3.2.1 実験計画	30
3.2.2 試験体	30
3.2.3 加力装置および加力方法	32
3.2.4 測定方法	33
3.2.5 実験結果	34
§ 3. 3 考察	38
3.3.1 弾塑性挙動	38
3.3.2 局部座屈発生時のひずみ	43
3.3.3 耐力	43
3.3.4 変形能力	49

§ 3. 4	結論	51
	第3章の参考文献	52
第4章	一定軸力と変動水平力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動	54
§ 4. 1	序	55
§ 4. 2	実験	56
4.2.1	実験計画	56
4.2.2	試験体	58
4.2.3	加力装置および加力方法	59
4.2.4	測定方法	59
4.2.5	実験結果	60
§ 4. 3	局部座屈後挙動の解析	64
4.3.1	解析モデルと解析仮定	64
4.3.2	解析方法	65
§ 4. 4	考察	76
4.4.1	弾塑性挙動	76
4.4.2	座屈発生時のひずみ度	82
4.4.3	耐力	83
4.4.4	変形能力	91
4.4.5	解析結果の考察	93
§ 4. 5	結論	97
付録	1層1スパン骨組の局部座屈後挙動解析	98
	第4章の参考文献	103
第5章	一定軸力と変動水平力を受ける	
	コンクリート充填角形鋼管柱の弾塑性挙動	106
§ 5. 1	序	107
§ 5. 2	実験	109
5.2.1	実験計画	109
5.2.2	試験体	110
5.2.3	加力装置および加力方法	112
5.2.4	測定方法	112
5.2.5	実験結果	113
§ 5. 3	考察	116
5.3.1	弾塑性挙動	116
5.3.2	ひずみ挙動	121
5.3.3	曲げ耐力	124

5.3.4	変形能力	…128
5.3.5	コンクリート充填鋼管に対する幅厚比の制限値	…129
§ 5.4	結論	…129
	第5章の参考文献	…130
第6章	角形鋼管柱，円形鋼管柱	
	およびコンクリート充填角形鋼管柱の変形性能	…132
§ 6.1	序	…133
§ 6.2	各種規準，指針の検討	…134
	6.2.1 構造計算指針・同解説	…134
	6.2.2 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)	…139
	6.2.3 鋼構造限界状態設計規準（案）・同解説	…141
§ 6.3	結論	…142
	第6章の参考文献	…142
第7章	一定軸力と繰返し曲げを受ける	
	鋼・コンクリート合成断面の終局状態	…143
§ 7.1	序	…144
§ 7.2	解析	…145
	7.2.1 問題の設定および解析仮定	…145
	7.2.2 解析方法	…146
§ 7.3	解析結果と考察	…150
	7.3.1 解析パラメータ	…150
	7.3.2 結果と考察	…150
§ 7.4	結論	…159
	第7章の参考文献	…159
第8章	総括	…161
	謝辞	…166

第1章 序論

§ 1. 1 研究目的

本論文は地震力に対応する荷重を受ける鉄骨系柱材の挙動を明らかにすることを研究目的とするが、以下に関連する既往の研究の概観および本研究の意義について記す。

建築構造物の耐震設計および塑性設計に関連して、骨組を構成する部材、接合部、骨組を対象として、これまで数多くの研究が実験・解析の両面からなされてきており、最大耐力、変形能力、復元力特性等に関して多くの知見が得られている。

本論文が対象とする鋼構造の柱材に対する既往の研究を概観すると、1960年代半ばよりH形鋼柱材の弾塑性性状を調べるための研究が始められ、近年では局部座屈や横座屈現象まで含めて数多くなされてきている。それらの研究成果は、「鋼構造塑性設計指針^{1・1)}」, 「地震荷重と建築構造の耐震性(1976)^{1・2)}」のなかに発表されている。

ところで、わが国における建築構造物の構造設計法に関しては、1981年までは基本的には許容応力度設計法であり、応力を求めるときに構造物を弾性体として取り扱っていた^{1・3)}。すなわち、構造物各部の応力を想定される荷重に対しての弾性応答として計算し、その応力を許容応力度以下にすることにより、構造物の安全性を確認していた。その後、1981年6月に建築基準法施行令のうち耐震関係の規定が改訂された^{1・4)}。この設計法では、大地震に対する建築物の安全性を確認するため、建物各層の保有水平耐力、構造特性を表す係数 D_s を評価することが定められている。また、1990年には、「鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説^{1・5)}」が発表されており、ここでは地震荷重だけでなく全ての荷重に対して、終局限界状態設計をする事が規定されている。

これらの設計法を確立するため、また鋼構造ではその特徴の一つである高い塑性変形能力を考えると、強度に期待する設計法よりも、靱性に期待する設計法が合理的であり、外力を受けたときの構造物の最大耐力だけでなく、変形能力、エネルギー吸収能力を明らかにする必要がある。

骨組に地震力が作用したときの崩壊形式としては、はり崩壊形あるいは柱はり接合部パネル崩壊形が望ましいと言われているが、骨組が崩壊メカニズムになるには一般に最下階柱脚部での塑性ヒンジの形成が必要であること、また、他の骨組構成要素との耐力割合や骨組の挙動を正確に予測するためには、柱材の挙動を明らかにすることは、耐震設計上きわめて重要である。

したがって、本研究の目的は、構造物を構成する部材要素のうち、地震力に相当する外力を受ける柱材の弾塑性挙動を明らかにすることである。建築構造物の柱材の断面構成は、鋼構造、鉄筋コンクリート構造等、構造種別に対して数多くのものがあるが、本論文ではH形鋼、角形鋼管、円形鋼管、コンクリート充填角形鋼管を断面とする柱材を研究の主対象としている。これらの断面を持つ柱材を研究対象とした意義は以下のものと考えている。

H形鋼柱材に関しては、前述のように数多くの研究がなされているが、本論文では、それまで主として行われていた断面の強軸曲げに対する挙動ではなく、任意方向から水平力が作用し、軸力と2軸曲げを受ける場合の挙動を対象としている。H形断面のように、断面の強軸と弱軸に対する剛性および耐力に大きな差がある断面では、任意方向からの荷重を受けた場合の挙動を明かにしておくことは、地震時には地震動の水平2方向の成分による任意方向からの水平力が作用することを考えれば、耐震設計上重要であると考えられる。

鋼管断面柱材に対しては、新耐震設計法^{1)・4)}における1次設計で層間変形角の制限が出来て以来、建築物の柱材として角形鋼管の使用が大幅に増加したにもかかわらず、その弾塑性挙動を明らかにするための研究はほとんどなく、その耐震性能も明かになっていない状況であった。また、円形鋼管も角形鋼管ほどは使われてはいないが、建築構造物の柱材として使われているのに、研究はほとんど見られない状況であった。研究の少なかったのは、鋼管柱はH形鋼柱より捩れに対して強いいため、構面外安定度が高く、したがって安全であると考えられたためもあるが、このように研究の少ない状況の下で、実際の建築構造物に用いられている角形鋼管柱、円形鋼管柱の弾塑性挙動を明らかにすることは重要であると考えられる。

コンクリート充填角形鋼管柱に対しては、角形鋼管の幅厚比が「鋼構造設計規準^{1)・3)}」に規定されている幅厚比制限値以内の板要素を持つ柱材に関しては、かなりの実験が行われており、その弾塑性挙動も明かにされている。しかしながら、角形鋼管にコンクリートを充填すれば、鋼管の局部座屈モードが中空鋼管の場合とかわること、また、座屈後は鋼管が受けもっていた軸力をコンクリートが受け持つことにより座屈後挙動が改善され、板要素の幅厚比の大きい角形鋼管を用いても、中空鋼管柱材に比べてよい挙動が期待でき、その結果としてコンクリートを充填した角形鋼管の幅厚比制限値は緩和できると考えられる。しかしながら、幅厚比の大きい板要素よりなるコンクリート充填角形鋼管柱の研究は少なく、実験的に検証されてはいなかった。本論文では、幅厚比の大きい板要素よりなるコンクリート充填角形鋼管柱材の挙動を調べ、中空鋼管に対して規定されている幅厚比制限値はコンクリートを充填することによりどの程度まで緩和できるかについて考察した。コンクリートと鋼管の相互作用を考慮することにより、充填鋼管に対して幅厚比を緩和する事が出来れば、鋼とコンクリートの合成効果を考慮した合理的な設計を行えることになり意味をもつと考える。

以上のように本研究の特色は、近年、鋼構造の柱材として使われており、その挙動が明かにされていなかった柱材の挙動を調べたことにある。

§ 1. 2 論文概要

本論文は、本章「序論」および、全体の総括を行った第8章「総括」を含め、8章より構成されている。第2章から第7章は、以下に示す内容になっている。

- 第2章 一定軸力と任意方向水平力を受けるH形鋼柱材の弾塑性挙動
- 第3章 一定軸力と変動水平力を受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動
- 第4章 一定軸力と変動水平力を受ける角形鋼管柱の弾塑性挙動
- 第5章 一定軸力と変動水平力を受けるコンクリート充填鋼管柱の弾塑性挙動
- 第6章 角形鋼管柱，円形鋼管柱およびコンクリート充填角形鋼管柱の変形性能
- 第7章 一定軸力と繰返し曲げを受ける鋼・コンクリート合成断面の終局状態

各章は、その章の研究目的および既往の研究の概要について述べた「序」、研究方法および結果の考察を行った「本文」、およびその章で得られた知見を述べた「結論」で構成されている。以下に第2章から第7章までの概要を記す。

第2章は、H形断面柱を対象として、一定軸力と任意方向水平力を載荷する実験を行い、水平力の方向および軸力比が弾塑性挙動および耐力に及ぼす影響を調べることを目的とする。

試験体は、SS41の圧延および溶接H形鋼である。実験変数は(1)水平力の方向、(2)軸力比、(3)加力方法を選んだ。試験体数は合計13体である。

実験結果から、単調載荷を受ける試験体は、弱軸曲げに対応する強軸方向変位が最大耐力以後急増し、軸力比が大きい場合には弱軸方向変位はある限度以上ふえないことを示す。また、繰返し挙動は、荷重方向の変位振幅を一定にとっても、荷重と荷重直交方向の変位の関係が原点に対して点対称とならず、一方向に偏る場合があること等を示した。

また大変形域での挙動を予測するための剛塑性解析および種々提案されている柱材の設計式の検討を行うことにより、単調載荷を受ける試験体の大変形域での挙動は、剛塑性解析により1軸曲げの場合と同じ程度の精度で、概ね説明できること、最大耐力に関して種々提案されている柱材の設計式を、節点の横移動があり材端に塑性ヒンジが形成される柱材に直接適用すると節点移動のない場合に比べより安全側になること等を示した。

第3章は、円形鋼管柱を対象として、一定軸力と変動水平力を載荷する実験を行い、鋼管の径厚比、軸力比が弾塑性挙動および耐力に及ぼす影響を調べることを、現行の柱材の設計式を検討することを目的とする。

試験体はS T K 4 1の電縫鋼管またはS S 4 1の鋼板より製作した鋼管である。実験変数は、(1)鋼管の径厚比、(2)軸力比、(3)加力方法、(4)熱処理の有無を選んだ。試験体数は合計28体である。

実験結果より、径厚比が40と小さい試験体でも局部座屈の発生により抵抗力が低下することを示した。また、曲げ耐力、変形能力は径厚比が大きくなるにつれて低下することを示し、その評価式を求めた。

設計式に関しては、鋼構造設計規準による設計式は径厚比が規準の制限値を超える場合でも、安全側に耐力を評価出来ること、鋼構造塑性設計指針による設計式は、指針による径厚比制限値を超える場合には、危険側になる場合もあるが、比較的正確な耐力評価をしていることを示した。終局曲げ耐力に関しては、径厚比が40と比較的小さい場合でも、計算による全塑性モーメントを期待できない場合があることがわかった。また、本実験結果より変形能力の予測式を提案した。

第4章は、角形鋼管柱を対象として、一定軸力と変動水平力を載荷する実験を行い、角形鋼管の幅厚比、軸力比が弾塑性挙動および耐力に及ぼす影響を調べることを、また柱材の設計式の検討を行うことを目的とする。

試験体はS T K R 4 1の角形鋼管およびS S 4 1の鋼板より製作した角形鋼管である。実験変数は、(1)角形鋼管の幅厚比、(2)軸力比を主な変数に選んだ。試験体数は合計38体である。

実験結果より、幅厚比が大きくなるとフランジの局部座屈に引き続くウェブの局部座屈により急激に抵抗力が低下し、終局曲げ強度は全塑性モーメントを期待できないことを示した。鋼構造設計規準の幅厚比制限値を超える板要素よりなる角形鋼管柱の曲げ耐力の評価は、幅厚比制限値を超える部分を無効とする有効幅の概念を用いた降伏モーメントではほぼ安全側に評価出来ることを示した。また、柱材の設計式に関しても、有効幅の概念を用いれば、ほぼ安全側に耐力を評価出来ることを示した。また変形能力の評価式を既往の研究を含めて検討した結果、比較的よく変形能力を予測していることを示した。次に局部座屈崩壊形を仮定した解析を行い、実験結果と比較することにより幅厚比が33～47程度でフランジの局部座屈とウェブの局部座屈がほぼ同時に発生し、急激な抵抗力の低下の見られる角形鋼管柱の局部座屈後挙動は比較的よく追跡できる事を示した。

第5章は、一定軸力と変動水平力を受けるコンクリート充填角形鋼管柱および中空鋼管柱の実験を行い、弾塑性変形挙動を実験的に検討し、充填コンクリートの効果を考慮した角形鋼管の幅厚比制限値を求めることを目的とする。

主な実験変数として、(1)コンクリート充填の有無と(2)幅厚比をとり、合計26体の実験を行った。この実験の特長は幅厚比の大きい角形鋼管(幅厚比47～94)を用いたことである。実験結果より、中空鋼管に対して規定されている幅厚比制限値を超え

る板要素よりなる角形鋼管でも、コンクリートを充填することにより、中空鋼管に比べて耐力、変形能力は著しく向上することを示した。この理由は鋼管が局部座屈した後、鋼管が受け持っていた圧縮力がコンクリートに移るためであることをひずみ挙動から明らかにした。また、コンクリート充填鋼管に対しての幅厚比制限値は耐力・変形能力の観点から、中空鋼管にたいする値の2倍程度緩和出来ることを示した。

第6章は、円形鋼管、角形鋼管およびコンクリート充填角形鋼管柱材を対象とし、「構造計算指針・同解説」^{1.4)}、「建築耐震設計における保有耐力と変形性能」^{1.6)}及び「鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説」^{1.5)}で変形性能に関して設定されている値の妥当性を、第3章から5章の実験結果をもとに検討することを目的とする。

各種指針、規準で変形性能に関して提示されている数値の妥当性を論じた。また同じ変形性能と期待される寸法制限を持つ円形鋼管と角形鋼管を比較すると、円形鋼管の方が角形鋼管に比べて変形性能は優れていること、コンクリート充填角形鋼管柱材は、幅厚比が鋼構造設計規準の幅厚比制限値の2倍程度であっても、各種指針、規準で規定されている、少なくとも2番目のランクに対応している事を示した。

第7章は、一定軸力と繰返し曲げを受ける鋼・コンクリート合成断面の抵抗モーメントおよび断面重心のひずみ挙動に及ぼす軸力の大きさの影響を、解析的に明らかにすることを目的にする。

鋼材の応力度-ひずみ度関係をバイリニア、コンクリートの応力度-ひずみ度関係をひずみ限度のある剛塑性体として、問題を「一定軸力のもとで、定曲率振幅繰返し曲げを受ける鋼・コンクリート合成断面の曲率反転点の抵抗モーメント、断面重心のひずみ度を求める」こと設定し、差分方程式を用いて解析解を求めた。解析変数として、(1)鉄骨係数および(2)コンクリートの圧壊ひずみ度を選んだ。解析結果より、一定軸力と定曲率繰返し曲げを受ける断面のひずみ挙動は、圧縮力の大きさにより5種類に分類できることを示し、圧縮力が小さい場合には抵抗モーメントが荷重の繰返しのおと一定値となり、曲げ耐力の低下のない安定した挙動を期待できることを示した。

第1章の参考文献

- 1.1) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，1975.11.
- 1.2) 日本建築学会：地震荷重と建築構造の耐震性（1976），1977.1.
- 1.3) 日本建築学会：鋼構造設計規準，1970.5.
- 1.4) 日本建築センター：改訂建築基準法施行令新耐震設計基準に基づく構造計算指針
・同解説，1981.2
- 1.5) 日本建築学会：鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説，1990.2.
- 1.6) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)，1990.6