

第1章 序論

1.1 はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RCと呼ぶ）造建築物部材の力学的挙動は、「弾性挙動」→「ひび割れ発生」→「降伏」→「最終破壊」という破壊現象で代表される。

従来の設計法が許容応力度設計法であった関係上、弾性挙動から降伏直後までのRC部材の力学的性質については、それらの大部分が、実験または解析によって解明されつつある。

1980年の建築基準法の改正によって、終局強度設計法が導入されたため、降伏後から最終破壊に至る力学的挙動の定量的把握が必要となった。しかし、降伏後から最終破壊に至る力学的挙動についての研究は、歴史が浅く、未だ実験に依存しているのが現状である。その理由は、部材の降伏によって、ひび割れ面に沿ったずれやかぶりコンクリートのはく離に伴う圧縮鉄筋の座屈、及びせん断破壊に伴う横はらみなど、さまざまな破壊現象を解析仮定に取り入れることが困難な上に加えて、これらの現象のほとんどが、復元力特性の負勾配の原因となることによる数値解法の難しさによるものと考えられる。

降伏後から最終破壊に至る力学的挙動に関する既往の研究では、終局強度設計法を開発することを目的とした建設省総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」のように、パラメトリックに断面諸元を変えた試験体の破壊実験を行ない、それらの復元力特性とパラメーターの関係を回帰的に整理している場合が多い。

降伏後から最終破壊に至る破壊過程の究明、すなわち「部材の最終破壊はなぜ生じるのか？」という疑問を解明することは、終局強度設計を行なう上で不可欠である、部材の変形能力の定量的評価法を確立する上で極めて重要である。

この疑問を解くためのアプローチは、降伏後に部材内部で生じる上述したさまざまな破壊現象と復元力特性を、それぞれ理論的に結びつけることから始めなくてはならない。

そのため、既往の多くの実験的研究では、局部的に変位やひずみを測定したり、ひび割れの発生状況を観察したりすることによって、破壊原因を究明するための

情報を得ていた。

それに対して、素材の復元力特性からさまざまな仮定を用いて、部材の復元力特性を算出する有限要素法などの解析モデルを作製するために、野口[1.1] や、林、黒正、寺本[1.2] らが、曲げ降伏する部材に対して曲率や付着ずれ性状などを材軸方向に連続して測定した。

今井[1.3] は、鉄骨枠付 R C 耐震壁の鉄骨枠に生じるひずみを、連続的に詳細に調べることにより、内蔵ばりの有無が耐震壁の弾塑性性状に与える影響を明らかにした。

青山、小谷、Lavra Takahashi, 市之瀬ら[1.4][1.5]は、試験部分をグリッド状に分割し、それらの標点間の変位を測定すると共に、せん断ひずみの材軸方向分布を測定することによって、R C はりに設けられた貫通口が、変形モードに与える影響を調べた。

連続した標点間の変位の測定を行なうことにより、今までの局所的な変位やひずみの測定では把握が困難なさまざまな破壊現象を定量化し、それらを復元力特性と関係づけることが可能となる。しかし、その測定方法による実験的研究は、膨大な情報量进行处理する必要があるため、上述した研究を除くと、ほとんど行なわれていなかった。

一方、地震による被害は、我々にとって、最も大きな教訓となるが、残念なことに地震時の建物全体や各部材の挙動については、定量的に測定されていない場合が多かった。そのため、震害原因の究明にあたっては、目視で得られるさまざまな破壊現象を頼りに、地震時の建物全体や各部材の挙動を推定していた場合が多い。地震時の挙動を定量的に推定するためには、降伏後から最終破壊に至る様々な破壊現象と、復元力特性を結びつけることが必要となる。

R C 柱の最終破壊の因子は大きく分けて「曲げ変形による破壊」と「せん断変形による破壊」があり、通常の断面諸元と応力状態では、それら 2 つの因子が複合して 1 つの部材に現われるものと考えられる。従って、破壊性状を詳細に調べるためには、曲げ変形による破壊とせん断変形による破壊を定量的に分離することが不可欠である。

そこで、本研究では、R C 柱を材軸方向に多数の測定区間に分割し、曲率とせん断ひずみの挙動や分布などを詳細に調べ、曲げ変形またはせん断変形によって

現われる特徴的な破壊現象と、曲率やせん断ひずみの挙動、さらに復元力特性と結びつけることにより、定量的な震害原因の調査手法を提案すると共に、「部材の最終破壊はなぜ生じるのか？」という疑問を解くための糸口を探った。

以下に本論文の第2章から第5章で行なわれた研究内容を示す。

第2章では、従来、定性的であった破壊形式の判定を、曲げ変形によって吸収されたエネルギー量とせん断力によって吸収されたエネルギー量の割合を示すことにより定量化した。

また、素材の破壊程度を表わす指標としてエネルギー吸収量を用いて、破壊程度の分布を定量的に示した。特に、曲げ降伏する柱では、主筋によって吸収されるエネルギー量が非常に大きいことを示した。

第3章では、せん断変形により生じる破壊現象と復元力特性の関係について述べた。

せん断変形により生じる破壊現象の代表例として横はらみがある。ここでは、柱のコア部分のコンクリートを2次元非線形異方性体と仮定した解析モデルを用いて、横はらみ量とせん断ひずみの関係を理論的に導いた。その過程において、横はらみ量と軸方向伸縮量が密接な関係にあることを示した。

実験では、解析で用いた仮定や導かれたそれらの関係式の妥当性を示した。

第4章では、曲げ変形により生じる破壊現象と復元力特性の関係について述べた。

曲げ変形により生じる終局時の代表的な破壊現象に、圧縮側コンクリートの圧壊、及びはく落や、それに伴う圧縮鉄筋の座屈がある。これらの破壊現象が生じる原因には、材料強度、断面諸元、配筋詳細、断面に作用する応力状態、変位履歴など、様々な因子がある。

本論文では、比較的研究例の少ない、変位履歴の相違が、上述した破壊現象や復元力特性に与える影響を詳細に調べるために、実験結果に基づいて、断面解析モデルと部材解析モデルを作り、解析結果と実験結果を定量的に比較した。そして、曲げ降伏するRC柱の終局時に観察される上述した破壊現象と復元力特性の関係を定量的に結びつけた。

第5章では、RC柱の各柱の破壊形式で共通して認められる破壊現象である「軸方向縮み」と復元力特性、及び、その他の破壊現象の関係について述べた。

RC柱の軸方向縮みは上階の荷重が支えきれなくなる前兆であり、その進行は構造物の倒壊を招くため非常に危険である。RC柱の局所的な破壊や復元力特性における耐力の劣化と軸方向縮みの始まりは、深く関係しているはずであり、本章ではそれらの関係を第2章から第4章で得られた実験結果より考察した。

第6章では、第2章から5章で得られた研究成果をまとめるとともに、今後の展望を示した。

1. 2 耐震設計と本研究の係わり

我が国の耐震工学の研究は、濃尾地震が起きた翌年の1891年に政府の正式機関である「震災予防調査会」の発足によって始まった。震災予防調査会は、それまでの幾多の震害経験に基づき、1895年に「木造耐震家屋構造要領」を発表した。

佐野利器は、1916年に「家屋耐震構造論」を発表した。その中で、現在の耐震設計の基本である地震の最大加速度などを考慮した「震度」が提案された。

1920年には、我が国最初の建築法規である「市街地建築物法及び同施行令」が公布された。この施行令によって、我が国の構造計算法の基本である「設計用荷重」「骨組みの応力度」「材料の許容応力度」からなる許容応力度設計法が確立された。しかし、1920年の施行令は、鉛直荷重だけを設計用荷重としていたので、1923年の関東大地震で多くの建築物が被害を受けた。その後、関東大地震で地震力を考慮して設計された建築物の被害が軽微だったことを考慮して、1924年に地震力（震度 $K=0.1$ ）を設計用荷重に付け加えるように施行令が改定された。

作用外力の大きさが明確な鉛直荷重に対しては、許容応力度法による構造計算で安全は保証されるが、作用外力の大きさが不確定な地震力に対しては、許容応力度法による構造計算と余剰耐力が十分発揮できるような構造詳細を定めることで、安全性を確保していた。そこで、過去の震害経験から得られた注意事項が「建築物耐震構造要項」として1943年に学術振興会から公表された。その後「建築物耐震構造要項」は、さらに検討が加えられ、1944年の戦時規格、1948年の日本建築規格3001を経て、1950年の建築基準法の公示に至った。従来の市街地建築物法施行令では1種類であった設計荷重を、1950年の建築基準法では長期荷重と短期荷重に分け、それぞれについて構造計算して、安全側を採用するように義務づけられた。特に地震力等の短期荷重については、従来の市街地建築物法施行令では、設計用荷重を控え目な値とし、その代わりに許容応力度を決める際の安全率を大きくしていたのに対して、1950年の建築基準法では設計用荷重を予期される外力の最大値とし、それに伴い許容応力度を材料の限界強度に近くした点が大きく異なっている。すなわち、建築基準法では設計震度が市街地建築物法時代の2倍に引き上げられたのに伴い、許容応力度も

2倍に引き上げられた。

従って実質的には1950年の建築基準法が要求していた耐震性能は、関東大地震の経験から生まれた市街地建築物法が要求していたものとほとんど同じであった。しかし、高度経済成長に伴い、鉄筋コンクリート造建築物の構造様式は、関東地震当時の開口が小さく壁が多い構造、すなわち構造計算外の余剰耐力の多い構造から、壁が少なく、内部空間が広いラーメン構造、すなわち構造計算外の余剰耐力の少ない構造へと変化した。さらに経済性の追求から、要求耐震性能ぎりぎりの設計が多く行なわれるようになった。

1968年に発生した十勝沖地震では、多くの鉄筋コンクリート造建築物が大破または倒壊した。鉄筋コンクリート造建築物の被害が目立ったのは、鉛直部材のせん断破壊であり、構造物の「変形能力」を定量的に考慮しなかった、当時の設計法に疑問を投げ掛けた。

日本建築学会では過去の震害経験やそれまでの研究成果を設計に反映させるために、鉄筋コンクリート造構造計算規準に柱の靱性能を確保するための規定を追加した。具体的には、1971年の改定前では「帯筋間隔を30cm以下、材の最小径以下、かつ、主筋直径の15倍以下」であったのに対して、改定後では「特別な場合を除き、帯筋には直径9mm以上またはD10以上の異形鉄筋を用い、その間隔は柱端部で10cm以下、その他の部分では15cm以下とし、かつ帯筋比は0.2%以上とする。また、帯筋の端部は135°以上曲げて定着する。」という様にせん断補強を重視し、変形能力の確保に注意を払った。

1972年から建設省を中心に総合技術開発プロジェクト「新耐震設計法の開発」が着手され、約260体もの鉄筋コンクリート造柱部材の破壊実験が行なわれ、強度や変形能の向上を目指してパラメトリックに研究が行なわれた。

1978年の宮城県沖地震でも十勝沖地震の時と同様に鉛直部材のせん断破壊が目立った。しかし、この時被害を受けた建築物の大部分は、改定前の基準で建てられたもの、または偏心し易い構造のものなどであった。

1980年の建築基準法の大改正で現行の耐震規定が生まれた。その主な特徴は、中小地震に対しては、従来の許容応力度法で設計し、建築物の被害を軽微なものにいくとめることを確認するとともに、巨大地震に対しては、終局強度設計法によって建築物が崩壊しないことを確認するように義務づけたこ

とである。すなわち、従来の設計法では、部材強度のみで地震力に抵抗するように設計していたのに対して、現行の設計法では、中小地震では地震力に対して部材強度で抵抗できるように、かつ、巨大地震では部材強度と変形能力の積（部材のもつ塑性エネルギー）で地震力に抵抗できるように設計することが義務づけられた。

1980年の改正前の建築基準法では、変形能力を建築物の余剰耐力として期待していたが、その定量的な評価は具体的には行なわれていなかった。しかし、1980年の改正により、終局強度設計法を実施するにあたり、部材のもつ変形能力を定量的に評価する必要が生じた。

鉄筋コンクリート造部材の強度評価法については許容応力度法で必要とされていたので、多くの研究がなされ、曲げ強度については理論体系がほぼ確立され、せん断強度については半理論式や実験式が確立されつつあるが、部材のもつ変形能力については研究の歴史が浅いため、理論体系が確立されておらず、その評価は未だ破壊実験に頼っているのが現状である。

部材の変形能力を定量的に把握するためには、降伏耐力付近の性状のみならず、崩壊寸前に至るまでの破壊性状と復元力特性の関係を詳細に調べる必要がある。

そこで本論文では、地震時に生じる破壊のうち、建築物全体の崩壊に結びつく可能性の大きい鉛直部材、特に柱部材の破壊に注目し、各種の破壊形式について、鉄筋コンクリート柱部材に現われる大変形時の破壊性状と復元力特性の関係を実験と理論の両面から研究した。

1. 3 参考文献

- [1.1] 野口 博：「鉄筋コンクリート柱の力学的挙動に関する研究（その1）
実験概要、曲げ変形、鉄筋およびコンクリートの歪について」，日本建築学会論文報告集，第233号，昭和50年7月
- [1.2] 林 静雄，黒正清治，寺本英治：「変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ変形性状に関する実験的研究 その1 実験および断面解析」，日本建築学会論文報告集，第289号，昭和55年3月
- [1.3] 今井 弘：「内蔵ばりのある鉄骨枠付き耐震壁の弾塑性性状に関する研究—その1 間接実測値から見た内蔵ばりの効果—」，日本建築学会論文報告集，第311号，昭和57年1月
- [1.4] 青山博之，小谷俊介，Lavra Takahashi，市之瀬敏勝：「開口の有無による鉄筋コンクリート梁の変形モードの相違に関する実験的研究（その1．実験方法と結果の概要）」，日本建築学会東海支部研究報告，昭和58年2月
- [1.5] 市之瀬敏勝，小俣則之，青山博之，滝口克巳：「開口の有無による鉄筋コンクリート梁の変形モードの相違に関する実験的研究（その2．変形モードの分析）」，日本建築学会東海支部研究報告，昭和58年2月
- [1.6] 梅村 魁ほか：「新版 新しい耐震設計—建築基準法新耐震設計基準—」，日本建築センター，昭和56年7月
- [1.7] 「建築学大系14 構造設計法」，彰国社，昭和40年2月
- [1.8] 「1968年十勝沖地震災害調査報告」，日本建築学会，昭和43年12月
- [1.9] 「建築研究資料 大変形下における鉄筋コンクリート柱の変形性能に関する資料集（その3）」，建設省建築研究所，No.21，1978年2月
- [1.10] 「1978年宮城県沖地震災害調査報告」，日本建築学会，昭和55年2月
- [1.11] 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」，日本建築学会，1962年
- [1.12] 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」，日本建築学会，1982年