

氏名	飯 藤 將 之
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成7年9月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第2項
最終学歴	昭和62年3月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻前期課程修了
学位論文題目	多軸応力を考慮した非線形部材モデルによる鉄筋コンクリート立体 架構の地震応答解析
論文審査委員	東北大学教授 小川 淳二 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 山田 大彦 東北大学助教授 渋谷 純一

論 文 内 容 要 旨

本研究は水平二方向の地震動が作用するときの鉄筋コンクリート立体架構の弾塑性挙動に関する解析的研究である。二方向入力に対する構造物の応答挙動の解明を目的として、1980年代の後半からこの種のテーマに関する研究が行われるようになってきている。

鉄筋コンクリート架構の耐震安全性を検討する場合、構造物においては、構成部材の力学的特性を表現する線材モデルと部材の弾性域から塑性域にわたる挙動を表す力-変形関係が必要となる。本研究の第一の目的は、従来鉄筋コンクリート部材の実験のシミュレーションに用いられてきたミクロな解析モデルであるファイバーモデルを立体架構の解析モデルとして拡張することにある。そして、材軸方向に柔性分布を仮定したファイバーモデルにより、柱の二軸曲げと変動軸力を考慮した二方向水平力を受ける鉄筋コンクリート立体架構の弾塑性解析を可能にする。

本研究の第二の目的は、構築した部材モデルによって、二方向水平力を受ける鉄筋コンクリート立体架構の弾塑性挙動、特に鉛直部材である柱の弾塑性応答挙動を詳細に把握することである。立体解析を行って得られる情報量は膨大であるが、これまでの立体解析の研究の主題は、二軸入力による応答の増大に関するものに限られている。即ち、最大応答変形や応力のベクトル量が静的一軸或いは動的一軸に対して増大する割合の定量化が主題で、二方向変形による架構応答や柱部材の弾塑性挙動を論じているとは言い難い。鉄筋コンクリート柱の二軸曲げ相互作用とは、1) 一軸曲げに比べて一方向に投影した降伏耐力が下がること、2) 一軸曲げよりも厳しい応力状態が形成されて塑性化が進展し易くなることの二点と考える。本研究では、柱の二軸曲げと変動軸力を考慮できるモデルとしてファイバーモデルを、二軸曲げが考慮できて変動軸力の作用が入らないモデルとして既に提案されている多方向剛塑性曲げバネモデルを取り上げて、部材モデルによる二軸曲げと変動軸力の考慮・非考慮が架構の応答に及ぼす影響を明らかにする。

本研究の第三の目的は、二方向水平力を受ける鉄筋コンクリート柱の曲げ降伏後の靱性性能を検討することである。多くの実験結果より、二方向の変位履歴を与えられた柱の靱性は、一方向の変位履歴を受ける場合より小さいことが指摘されている。この現象を解析的に変形方向による靱性性能の優劣として検討する。この検討のためには、歪軟化特性を取り入れた解析が必要である。本研究で構築する部材モデルにより歪軟化特性を取り入れた解析の可能性を検討し、柱の限界変形の算定を試みる。

1章 序 論

1章では、本研究の目的を述べ、鉄筋コンクリート立体架構の弾塑性地震応答に関する既往の研究を部材モデル、解析内容、並びに二方向応答指標の各視点から整理し、更に論文の構成を示す。

2章 二軸曲げと変動軸力を受ける柱の挙動

2章では、本研究で構築する部材モデルについて詳述し、そのモデルを既往の二方向載荷実験のシミュレーション解析に適用して、柱の二軸挙動について述べている。

はじめに、材軸方向の柔性分布を仮定したファイバーモデルに基づいて二軸曲げと変動軸力を考慮した鉄筋コンクリート柱の解析モデルの定式化と非線形要素の履歴モデルを示す。更に、柱の二軸曲げ性状を比較するために用いる多方向剛塑性曲げバネモデルの定式化を示す。

以上の二つの部材モデルを、既往の鉄筋コンクリート柱の水平二方向載荷実験のシミュレーション解析と柱の安定限界を算定する解析に適用する。

まず、シミュレーション解析の結果、ファイバーモデルに基づくモデルは、コンクリートの最大強度以後の歪軟化特性を横拘束に関する既往の提案式から評価することにより、二方向載荷では部材角 $1/40$ 程度まで、一方向載荷では部材角 $1/30$ 程度までの変形に対して安定した解析が可能であり、しかも、水平力とともに変動する軸力を同時に受ける柱の曲げ耐力の増減を表現できることを示している。また、要素の状態変化に伴って発生する不釣合応力の解放をしない場合の解析結果を示し、本解析で行っている不釣合応力の総和を歪に変換して不釣合力を解放する補正方法が有効であることを示している。

次に、柱の安定限界を算定する解析では、断面の無次元平均圧縮応力や図心歪により推定された柱の安定限界に相関関係があることを示し、これらの安定限界より、柱が一方向に変形するときよりも対角方向に変形するときの方が曲げ降伏以後の靱性性能が小さいことを示している。安定限界指標はコンクリートの歪軟化特性に依存する値であるが、本研究では、軟化勾配による変形量の大小関係よりも、変形方向の違いに焦点をあてて議論をしている。

3章 鉄筋コンクリート立体架構の静的弾塑性解析

3章は大きく三つの部分に分けられる。

第一は立体架構解析法を詳述する部分で、2章で構築した部材モデルを用いた全体剛性の作成法と水平力を受ける立体架構の静的解析をするために必要な定式化、並びに変位増分法による具体的な解析手順を述べている。

第二は3章と4章で解析する架構の設定で、3層、6層、9層の三種類の架構の曲げ設計を日本建築学会の鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針に基づいて行っている。降伏機構設計では、各階のはり端部と1層柱脚及び最上層柱頭に降伏ヒンジを容認し、降伏機構保証設計では静的非線形漸増解析で得た応力に割増係数を乗じて、中間層の非ヒンジ柱の設計を行っている。

第三は柱部材モデルを解析変数とした鉄筋コンクリート立体架構の静的解析である。柱部材として、1) 二軸曲げと変動軸力を考慮したファイバーモデル、2) 二軸曲げも変動軸力も無視したモデル、3) 二軸曲げのみ考慮した多方向剛塑性曲げバネモデルを用いて、静的弾塑性解析を行っている。水平変形を与える方向は、はりの架かっている方向(x方向)と建物伏図の対角軸方向(45°方向)とし、漸増解析により水平外力の重心となる層での相対水平変形角が $1/120$ になるまでの解析を行い、層レベルの水平力-変形関係と塑性化、1層の柱の弾塑性性状、各層の柱の応力などについて検討している。

まず、x方向に変形するときの層せん断力に対する45°方向に変形を与えた場合の層せん断力ベクトルの割合は、低層架構の場合、柱の二軸曲げの考慮・非考慮によって $1.21\sim 1.35$ と変化するが、高層架構の場合、柱の二軸曲げの考慮の有無に拘らず概ね 1.3 程度となり、高層架構ほど柱の二軸曲げの影響が架構全体の挙動に影響しないことを指摘している。また、対角方向に変形するときの層せん断力のx方向成分は、直交方向の変形のない場合の90%程度であり、はり降伏型の架構では、降伏曲面が円と矩形の中間的なものとなることを示している。

一方、局所的な挙動に関しては、柱ヒンジ部分の塑性率に着目している。一方向に変形するときの1層柱脚の塑性率に対する二方向の変形するときの1層柱脚の塑性率の割合が、二軸曲げを無視すると殆ど変わらないのに対して、二軸

曲げと変動軸力を考慮した場合に1.2倍程度となることを指摘している。

更に、局所的な挙動として、水平力とともに付加される変動軸力を受ける柱の荷重-変形関係について述べている。架構がx方向と45°方向に変形するのに伴って生じる変動軸力の割合について示し、軸力が釣合軸力と終局引張軸力の範囲で変動するときに作用せん断力が増減する現象について詳細に述べている。

また、既往の二方向増大率の研究と関連させ、架構が45°方向に変形する時の柱の応力増大について検討している。そして、架構が45°方向に変形する時の層せん断力の増大割合である1.3という値が、柱のせん断力ベクトルの増大率に対しては平均値に相当し、柱の曲げモーメントベクトルの増大率に対しては上限値に相当することを示している。

4章 鉄筋コンクリート立体架構の弾塑性地震応答解析

4章では、本研究で構築した部材モデルを柱に適用して柱の二軸曲げと変動軸力を考慮した弾塑性地震応答解析を行っている。解析変数は、構造物、地震波、入力パターン、入力レベルであり、二方向同時入力を受ける鉄筋コンクリート立体架構の応答性状について検討している。結果的に4章の応答解析では、50 [kine] に規準化した殆どの解析ケースの応答変形が3章での静的解析での最終変形以下であったが、二方向入力による架構の応答特性に関して様々な知見が得られている。

まず、架構の全体的特性としては、一方向の応答変形や一方向の層せん断力は直交方向入力の影響を受けないことを示すとともに、3章で行ったx方向と45°方向と静的解析での層せん断力の比が二方向入力時の層せん断力ベクトルの増大率の上限値に相当することを示している。3章と同様に、1層の柱脚の塑性率は二方向入力により一方向入力時より20%程度大きくなり、その傾向は低層架構ほど顕著であることを示している。

次に、地震応答解析における柱の応力について検討し、変動軸力は、降伏メカニズムを仮定して略算した変動軸力に対して、一方向入力では約1.0倍、二方向入力では約1.8倍であることを示している。

柱の応力割増率に関してはこれまで多くの研究がなされている。本解析での柱のせん断力ベクトルと曲げモーメントベクトルの二方向増大率は、1.0~1.3に分布するが、3章の静的解析の結果と比較すると、45°方向静的解析とx方向静的解析の層せん断力の比である1.3が動的二方向増大率の上限値に相当することを指摘している。

最後に、部材モデルの特徴であるミクロな観点から、1層柱脚の図心歪のデータを取り上げ、2章の部材解析で得た安定限界時の歪と比較し、二方向に50 [kine] 規準の入力を受ける架構における柱が安定限界に対して余裕を有することを述べている。

5章 結 論

5章では、各章で得られた結論を要約して総括している。

審査結果の要旨

建築骨組の合理的な耐震設計を行うためには、多方向の地動入力を受ける骨組の三次元的弾塑性挙動の把握が必須である。本論文では、鉄筋コンクリート造柱の二軸曲げと軸力の相互作用を考慮し得る部材モデルを開発し、この部材モデルを用いた多層立体骨組の水平二方向地震力に対する静的及び動的な解析により、二方向同時入力による骨組の応答の増大率や、二軸曲げと軸力の相互作用が部材の損傷に及ぼす影響を明らかにしたもので、全5章から成る。

第1章は序論である。

第2章では、以下の骨組解析に用いる鉄筋コンクリート柱の部材モデルを示している。柱頭と柱脚断面にファイバー法を用い、材軸に沿う柔性分布を適切に仮定することから、部材端の三次元的な力と変形に関する構成則を誘導している。本部材モデルを、鉄筋コンクリート柱の水平二方向曲げ実験のシミュレーション解析に適用し、解析結果は部材角1/40程度の大変形まで実験結果をよく説明し得ることを示した。また、本モデルを用いて、柱の安定限界変形に関する検討を行い、柱が対角軸方向に変形する場合、主軸方向に変形する場合より靱性性能が小さくなることを示した。

第3章では、崩壊形がはり降伏型となる3層、6層、9層の鉄筋コンクリート立体骨組モデルについて、骨組の主軸及び対角軸方向の地震力に対する静的解析を行い、対角軸方向加力の場合の主軸方向加力に対する応力や損傷の増大率を検討している。層せん断力の増大率は骨組の層数によって異なり、3層の場合は1.2程度であるが、高層になるに従って増加し、9層では約1.3と大きくなる。また、対角軸方向に変形する場合の1階の柱の塑性率は、主軸方向に変形する場合より約20%大きくなることを示した。

第4章では、前章に示した多層骨組モデルの一方向及び二方向地動入力による地震応答解析を行い、骨組応答や部材損傷に及ぼす二方向入力の影響及び静的応答との関係について検討を行っている。二方向入力による主軸方向の骨組変形や層せん断力は一方向入力と大差のないこと、二方向入力による柱応力は一方向入力の場合の最大約1.3倍となること、1階柱の変動軸力は静的な一方向メカニズム時の約1.8倍となることを明らかにした。

第5章は結論である。

以上要するに、本論文は二方向地震入力や部材の二軸曲げと軸力の相互作用が鉄筋コンクリート骨組の応答や部材の損傷に及ぼす影響を明らかにしたもので、建築学及び耐震工学の発展に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。