

柱梁接合部の力学的挙動を考慮した RC フレーム構造の 非線形挙動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は鉄筋コンクリート (RC) フレーム構造の柱梁接合部における各種力学的挙動を考慮して、フレーム全体の弾性領域から終局耐力に至るまでの荷重-変形応答ならびに構造部材各部の変形挙動を高精度かつ統一的に評価し得る解析法の確立を目的として行った研究であり、全4章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と RC フレーム構造の解析法を提案している既往の研究のうち、柱梁接合部の変形挙動を特徴付ける鉄筋の抜け出し・パネルのせん断変形を考慮して柱梁接合部のモデル化を行った研究について概観し、本研究の目的と概要について記述している。

第2章では、柱梁接合部における主筋の付着すべりを考慮した梁曲げ降伏型 RC フレーム構造の材料非線形解析法について論じている。地震力作用時の RC フレーム構造の履歴挙動は構成材料の特性や刻々と変化する部材内部の応力状態等の影響を受けて極めて複雑な非線形性を表すことが知られている。この非線形挙動のうちでもコンクリートと鉄筋から構成される RC 部材に特有の両材料間の付着性状に関連した柱梁接合部からの主筋の抜け出し現象は、これが付着劣化の段階まで発展すると RC フレーム全体の変形挙動に大きな影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では柱梁接合部における主筋の抜け出し挙動に着目して、この力学的挙動を接合部内部に至るまで詳細に表現し得る解析モデルを開発し RC 梁・柱の解析モデルを併用することで構築した RC フレーム構造の解析手法を提案する。

本章では、まず本解析法を構築する上で最も基本となる鉄筋の付着すべりを考慮した RC 梁・柱要素の誘導過程について示した後に、本研究で新たに提案する接合部内部の付着すべり挙動を詳細に表示し得る RC 接合部要素の構成手法と全体解析への適用について述べている。次いで、繰り返し荷重を受ける RC フレーム構造の変形挙動を適切に評価するために用いた各材料モデルを掲げ、特に刻々と変化する付着劣化の影響を表現可能な鉄筋の付着すべりモデルについて詳述している。更に、計3体の梁曲げ降伏型 RC フレーム構造の既往の実験結果を取り上げ、これらを対象とした数値計算より比較・考察を行った結果、以下のような知見を得た。

- (1) 本解析法が梁曲げ降伏型 RC フレーム構造の弾性領域から終局耐力に至るまでの荷重-変形応答を概ね良好に追跡可能であることを示し、柱梁接合部周囲では主筋の抜け出しに起因した付着劣化が生じる可能性があることを明らかとした。また、主筋の付着すべり・付着劣化の影響を考慮せずに解析を用いて性能評価を行った場合には、RC フレーム構造の耐震性能を実際に比べて過大に評価する危険性があることを指摘した。
- (2) 主筋の付着劣化による影響を考慮した本解析法はより実験結果に即して柱梁接合部からの主筋

の抜け出し量を評価することが可能であることを示した。また、この柱梁接合部での主筋のすべりを詳細かつ適切に表現することによって接合部を介して通し配筋される主筋の歪分布についても接合部内部・梁等を含めた部材全長にわたって比較的良好に表現し得ることを示した。

(3) 本解析法は通常の実験で用いられる十字型柱梁接合部のような内部部分架構のみならず、実構造に近いかたちの多層 RC フレーム構造全体の荷重-変形応答についてもより少ない要素数を用いて十分な精度で追跡可能であり、各層における部分的な変形挙動についても概ね表現し得ることを明らかにした。

第3章では、第2章において展開した解析法を基本手法として更に発展させた、接合部パネルのせん断変形を考慮した RC フレーム構造の材料非線形解析法について論じている。近年、材料の高強度化や建築物の高層化といった社会的な背景を理由に従来に比べてよりスレンダーな RC 梁・柱を構造部材として適用する事例が増えつつあるが、このような部材を用いた場合には材料コストの面やより良い居住性の確保等のメリットがある反面、その柱断面は従来よりも縮小化されるために柱梁接合部の負担が従来のものに比べてより増加することが懸念されている。また、このような柱梁接合部周囲の応力レベルがより高い状態になると主筋の抜け出しもより顕著になるものと予想され、主筋から接合部パネルへの付着力を介した応力伝達作用がフレーム全体に及ぼす影響は更に大きくなるものと想定される。そのため、本研究では今後増加すると考えられる高強度 RC フレーム構造のような、従来に比べて柱梁接合部に大きな負担を強いる可能性がある場合についても適用可能な汎用性の高い解析法の確立を目的として、柱梁接合部において複合的に作用する力学的挙動を考慮した RC フレーム構造の材料非線形解析法を提案する。

本章では、まず本研究で新たに提案するパネルのせん断変形を考慮した RC 柱梁接合部の有限要素法による解析モデルの誘導過程と、パネルのせん断変形や鉄筋の付着すべり等の変形挙動を適切に表現するために解析モデルに施した設定手法について述べている。次いで、繰り返し荷重を受ける接合部パネルのせん断特性を精度良く表現するために導入した材料モデルについて示し、この材料モデルの特性値を算定するために用いた予備解析手法について記述している。更に、梁曲げ降伏後にせん断変形等により柱梁接合部での損傷が生じた2体の RC フレームの実験結果を対象とした数値解析より比較・考察を行い、以下のような知見を得た。

(1) 接合部パネルのせん断変形を考慮した本解析法は、主として柱梁接合部の損傷に起因した逆 S 字型の荷重-変形応答を十分な精度で表現し得ることを示し、柱梁接合部を剛体と仮定した解析結果に比べてより実験結果に即した性能評価が可能であることを明らかにした。また、接合部パネルのせん断変形を考慮することにより、柱梁接合部において生じる主筋の抜け出しをより実験結果と対応して表現可能なことを示した。

(2) 柱梁接合部の変形挙動を特徴付けるパネルのせん断特性と主筋の付着特性を変数とするパラメトリック解析を実施し解析結果の比較・考察を行うことで、RC フレーム構造の変形挙動に及ぼす柱梁接合部に関連したそれぞれの特性の相互関係について言及し、主筋の付着状態を良好とした場合には柱梁接合部での主筋の抜け出しが抑制できる反面、パネル部分のせん断変形による損傷は増加する可能性があること等について示した。

第4章では、各章で得られた知見を総括し、本論文のまとめと本研究に残された課題、今後の展開について記述した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 正 生
副 査 教 授 緑 川 光 正
副 査 教 授 後 藤 康 明

学 位 論 文 題 名

柱梁接合部の力学的挙動を考慮した RC フレーム構造の 非線形挙動解析に関する研究

鉄筋コンクリート (RC) フレーム構造に対する現行の耐震設計の枠組みは、梁曲げ降伏型の全体降伏機構を目標とすることが一般的であり、このためには柱梁接合部には可能な限り損傷を生じさせないことが要求される。しかしながら、被震時の柱梁接合部における接合部パネル部分のせん断ひび割れの発生や接合部内部における主筋の付着劣化を回避することは現実的に困難であり、特に今後一層の利用増加が見込まれる高強度材料を用いた RC フレーム構造においては、梁や柱の断面が縮小化されることに伴って、相対的に柱梁接合部は過度の負担を強いられる危険性が懸念されている。このため、近年では柱梁接合部における力学的挙動を定量的に評価することが重要視されつつあるが、大きな繰り返し荷重下の柱梁接合部における劣化現象をも適切に表現可能な解析法は、未だ整備されていないのが現状のようである。

本論文は RC フレーム構造の柱梁接合部における各種力学的挙動を考慮して、フレーム全体の弾性領域から終局状態に至るまでの荷重-変形応答ならびに構造部材各部の変形挙動を高精度かつ統一的に評価し得る解析法の確立を目的として行った研究であり、全 4 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景と RC フレーム構造の解析法を提案している既往の研究のうち、柱梁接合部の変形挙動を特徴付ける主筋の抜け出し・接合部パネルのせん断変形を考慮して柱梁接合部のモデル化を行った研究について概観し、本研究の目的と概要について記述している。

第 2 章では、柱梁接合部における主筋の付着すべりを考慮した梁曲げ降伏型 RC フレーム構造の材料非線形解析法について論じている。即ち、まず本解析法を構築する上で最も基本となる鉄筋の付着すべりを考慮した RC 梁・柱要素の誘導過程について示した後に、本研究で新たに提案する接合部内部の付着すべり挙動を詳細に表示し得る RC 接合部要素の構成手法とフレーム全体の解析への適用方法について述べている。次いで、繰り返し荷重を受ける RC フレーム構造の変形挙動を適切に評価するために用いた各材料モデルを掲げ、特に刻々と変化する付着劣化の影響を表現可能な鉄筋の付着すべりモデルについて詳述している。更に、計 3 体の梁曲げ降伏型 RC フレーム構造の既往の実験結果を取り上げ、これらを対象とした数値計算より比較・考察を行った結果、本解析法が形状の異なるいずれの試験体に対しても、その弾性領域から終局耐力に至るまでの荷重-変形応答と主筋の抜け出し現象を概ね良好に追跡可能であることを示し、更に柱梁接合部における主筋の付着すべり・付着劣化の影響を考慮せずに解析を用いて性能評価を行う場合には、RC フレーム構

造の耐震性能を実際に比べて過大に評価する危険性があることを指摘している。

第3章では、第2章において展開した解析法を基本手法として更に発展させた、接合部パネルのせん断変形を考慮したRCフレーム構造の材料非線形解析法について論じている。即ち、まず本研究で新たに提案するパネルのせん断変形を考慮したRC柱梁接合部の有限要素法による解析モデルの定式化について示した後に、柱梁接合部におけるパネルのせん断変形や鉄筋の付着すべり等の変形挙動をフレーム全体の解析において表現するために、柱梁接合部の解析モデルに施した設定手法について述べている。次いで、繰り返し荷重を受ける接合部パネルのせん断特性を精度良く表現するために導入した材料モデルについて示し、この材料モデルの特性値を算定するために用いた予備解析手法について記述している。数値計算例では、梁曲げ降伏後に柱梁接合部にせん断による損傷が生じた2体のRCフレームの実験結果を対象とした比較・考察を行い、本解析法が、主として柱梁接合部の損傷に起因した逆S字型の荷重-変形応答を十分な精度で表現し得ることを示すとともに、柱梁接合部の変形挙動を特徴付けるパネルのせん断特性と主筋の付着特性を変数とするパラメトリック解析を実施し、RCフレーム構造の変形挙動に及ぼすそれぞれの特性の相互関係について言及している。

第4章では、各章で得られた知見を総括し、本論文のまとめと本研究に残された課題、および今後の展開について記述している。

これを要するに、著者は柱梁接合部の力学的挙動を特徴付ける鉄筋の抜け出し現象ならびに接合部パネルのせん断変形を詳細に表現可能な新たな柱梁接合部の解析モデルを提案し、このモデルを用いたRCフレーム構造の材料非線形解析法を展開・開発して、本解析法が十分な妥当性を有していることを示すとともに、これまで統一した見解が得られていない柱梁接合部におけるパネルのせん断特性と主筋の付着特性の相互関係について検討を加えたものであり、コンクリート構造学、および構造解析学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。