

補強材の付着すべりを考慮した コンクリート梁・柱部材の非線形挙動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

コンクリートフレーム構造は、鉄筋コンクリート (RC) 部材やプレストレストコンクリート (PC) 部材、更にはプレキャストコンクリート (PCa) 部材等を主体構造とし、これらをその使用目的に応じて構造物の各部に配置することにより様々な架構形状を実現し得る反面、その荷重-変形応答は、複雑な非線形挙動を示すことが知られている。このため、建築構造の分野における性能評価型設計では、とりわけこの種の構造の変形応答をいかに精度良く予測できるかが一つの重要な課題であり、高精度で適用性の広い解析法の確立が望まれている。

コンクリートフレーム構造の弾性から材料非線形領域を経て破壊に至る荷重-変形応答解析には、一般にファイバーモデルによる有限要素解析法が用いられる。これは、①梁や柱といった曲げが卓越する部材の解析に適している、②数少ない要素数、自由度でフレーム構造全体を取り扱うことができる、③材料の非線形特性を容易に取り込むことができる、等の理由によるもので、ファイバーモデルを用いたコンクリートフレーム部材の研究についても既に数多く行われている。しかしながら、これらはまだ、部材全体にわたる補強材（アンボンド PC 緊張材を含む）の付着すべり現象や横せん断変形の影響、更には幾何学的非線形性といったどのような力学状態をも統一的に取り扱うことが可能な、適用性の高い解析手法にまでは至っていないのが現状のようである。

本論文は、フレーム構造を構成するコンクリート梁・柱部材 (RC, PC, PCaPC 構造を含む) の破壊に至るまでの荷重-変形応答を、ファイバーモデルを用いて「統一的に表現し得る解析モデルの開発」を目的として行った研究で、全 5 章より構成されている。

第 1 章では、本研究の背景とファイバーモデルを用いたコンクリート梁・柱部材の非線形挙動解析に関する既往の研究を概観し、本研究の目的およびその概要を記述している。

第 2 章では、本研究の最も基本となる、軸力と曲げを受けるコンクリート梁部材を対象とした、補強材の付着すべりを考慮した場合の有限要素法による材料非線形解析法について論じている。即ち、まずはじめに、全ポテンシャル・エネルギーの原理に基づいた有限要素法への定式化を行い、梁断面を積層要素分割したファイバーモデルで表示した、材料非線形解析のためのコンクリート梁要素を誘導している。次いで、繰返し载荷を含むコンクリート梁部材の荷重-変形応答を適切に表現するために設定した材料の特性と構成関係について述べ、コンクリートの破壊力学に基づく引張・圧縮両側の軟化特性を考慮した非線形な応力-歪関係、補強材の Baushinger 効果を適切に表現し得る Menegotto-Pinto モデルを用いた応力-歪関係、ならびに補強材とコンクリートの間の付着応力-すべり関係を記述している。また、数値計算例では、近年注目されている圧着型のプレキャスト・プレストレストコンクリート (PCaPC) 部材の実験結果と本解析値との比較・検討を行って、本解析手法の妥当性を検証するとともに、解析結果に及ぼす付着すべりの影響について考察されている。

第3章では、梁部材のたわみに及ぼす横せん断変形の影響を考慮したチモシェンコ梁理論に基づく、コンクリート梁の材料非線形解析法を開発するための、3段階にわたる解析法について取り扱っている。即ち、まず第一に、コンクリートと補強材間に付着すべりを許した場合の、弾性領域におけるコンクリート・チモシェンコ梁部材の有限要素解析法について記述している。ここでは、チモシェンコ梁のせん断剛性算定のための歪エネルギーに関する考察を行い、特定の断面形状にのみ与えられているせん断補正係数のような断面定数を改めて設定する必要がなく、任意の断面を有する梁や後の材料非線形領域における解析にもそのまま適用することが可能な、補強材の付着すべりの効果を含めた梁の横せん断変形に関する歪エネルギーの評価法を提示している。また、先の解析法と同様に全ポテンシャル・エネルギーの原理に基づき有限要素法への定式化を行っている。

第二に、この弾性解析法の基本手法の材料非線形領域における最初の適用例として、材料の特性として最も基本的な弾塑性材料で構成される梁を取り上げ、曲げとせん断の複合応力状態を想定し、その降伏判定に平面応力場の Mises の降伏条件を採用した場合のチモシェンコ梁部材の弾塑性解析法を展開している。即ち、まず有限要素法への定式化を行うために必要となる曲げ、および横せん断に関する梁の歪エネルギーについての考察を行い、Mises の降伏条件下における塑性域での垂直応力-歪成分と横せん断応力-歪成分との連成問題を解消し、積層化断面内の弾性・塑性の両領域を統一的に取り扱うことが可能なチモシェンコ梁要素を提案している。次いで、塑性域を含む梁断面内における垂直応力分布、および横せん断応力分布を適切に表現するための応力評価方法を示している。

第三に、これらのチモシェンコ梁の解析法を更に拡張し、曲げとせん断による2軸応力下のコンクリートの亀裂を伴う、より複雑な材料非線形挙動を示すコンクリート・チモシェンコ梁部材への適用を試みている。即ち、まず、このためのファイバーモデルによる有限要素法への定式化を行い、次に、ここで新たに設定した2軸応力下のコンクリートの応力-歪関係および破壊条件を示し、あわせてこの構成則をコンクリート・チモシェンコ梁要素に適用した場合の応力・歪算定手法について記述している。また、これら3種の解析法による数値計算例を掲げ、その妥当性の検証を行っている。

第4章では、第2章において展開した「微小変形理論に基づく材料非線形解析」の基本手法を用いて、部材全体の幾何学的非線形性をも取り扱うことが可能な、Updated Lagrangian法に基づく補強材の付着すべりを考慮したコンクリート梁・柱部材の大変形解析法について論じている。まず第2章で誘導した材料非線形解析のためのコンクリート梁・柱要素を用いた場合の大変形解析法について記述し、このための補強材の付着すべり作用を取り入れた大変形領域における非線形解析手法を提示している。次いで、この方法を軸力と2方向曲げ、およびねじりを受けるコンクリート梁・柱部材の大変形解析法に拡張し、要素座標系の有限要素法への定式化ならびにねじり剛性の算定法を示すとともに、部材のポストピーク挙動を困難なく追跡し得る弧長増分法の概要について記述し、更に、若干の数値計算例を掲げ、既往の RC、PC 試験体の実験結果との比較、ならびにモデル試験体の解析結果の考察を行い、本解析法の妥当性を検証している。

第5章においては、以上の各章で得られた知見について総括し、本研究のまとめと今後の研究課題を述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 正 生
副 査 教 授 城 攻
副 査 教 授 石 山 祐 二
副 査 教 授 三 上 隆

学 位 論 文 題 名

補強材の付着すべりを考慮した

コンクリート梁・柱部材の非線形挙動解析に関する研究

コンクリートフレーム構造は、鉄筋コンクリート (RC) 部材やプレストレストコンクリート (PC) 部材, 更にはプレキャストコンクリート (PCa) 部材等を主体構造とし, これらをその使用目的に応じて構造物の各部に配置することにより様々な架構形状を実現し得る反面, その荷重-変形応答は, 複雑な非線形挙動を示すことが知られている. このため, 建築構造の分野における性能評価型設計では, とりわけこの種の構造の変形応答をいかに精度良く予測できるかが一つの重要な課題であり, 高精度で適用性の広い解析法の確立が望まれている.

コンクリートフレーム構造の弾性から材料非線形領域を経て破壊に至る荷重-変形応答解析には, 一般にファイバーモデルによる有限要素解析法が用いられる. これは, ①梁や柱といった曲げが卓越する部材の解析に適している, ②数少ない要素数, 自由度でフレーム構造全体を取り扱うことができる, ③材料の非線形特性を容易に取り込むことができる, 等の理由によるもので, ファイバーモデルを用いたコンクリートフレーム部材の研究についても既に数多く行われている. しかしながら, これらはまだ, 部材全体にわたる補強材の付着すべり現象や横せん断変形の影響, 更には幾何学的非線形性といったどのような力学状態をも統一的に取り扱うことが可能な, 適用性の高い解析手法にまでは至っていないのが現状のようである.

本論文は, フレーム構造を構成するコンクリート梁・柱部材 (RC, PC, PCaPC 構造を含む) の破壊に至るまでの荷重-変形応答を, ファイバーモデルを用いて「統一的に表現し得る解析モデルの開発」を目的として行った研究で, 全 5 章より構成されている.

第 1 章では, 本研究の背景とファイバーモデルを用いたコンクリート梁・柱部材の非線形挙動解析に関する既往の研究を概観し, 本研究の目的およびその概要を記述している.

第 2 章では, 本研究の最も基本となる, 軸力と曲げを受けるコンクリート梁部材を対象

とした、補強材の付着すべりを考慮した場合の有限要素法による材料非線形解析法について論じている。即ち、梁断面を積層要素分割したファイバーモデルで表示し、更に繰返し荷重を含むコンクリート梁部材の荷重－変形応答を適切に表現するために設定した材料の特性と構成関係の導入について記述している。また、数値計算例では、近年注目されている圧着型の PcaPC 部材の実験結果と本解析値との比較・検討を行い、本解析手法の妥当性を検証すると共に、解析結果に及ぼす付着すべりの影響について考察している。

第 3 章では、梁部材のたわみに及ぼす横せん断変形の影響を考慮したチモシェンコ梁理論に基づく、コンクリート梁の材料非線形解析法を開発するための、3 段階にわたる解析法について取り扱っている。即ち、まず第一に、コンクリートと補強材間に付着すべりを許した場合の、弾性領域におけるコンクリート・チモシェンコ梁部材の有限要素解析法について論じている。第二に、この弾性解析法の基本手法の材料非線形領域における最初の適用例として、材料の特性として最も基本的な弾塑性材料で構成される梁を取り上げ、曲げとせん断の複合応力状態を想定し、その降伏判定に平面応力場の Mises の降伏条件を採用した場合のチモシェンコ梁部材の弾塑性解析法を展開している。第三に、これらのチモシェンコ梁の解析法を更に拡張し、曲げとせん断による 2 軸応力下のコンクリートの亀裂を伴う、より複雑な材料非線形挙動を示すコンクリート・チモシェンコ梁部材への拡張・展開を行なっている。また、上記の 3 種の解析法による数値計算例を掲げ、既往の実験結果との比較・考察を行い、その妥当性の検証を行っている。

第 4 章では、部材全体の幾何学的非線形性をも取り扱うことが可能な、Updated Lagrangian 法に基づく補強材の付着すべりを考慮したコンクリート梁・柱部材の大変形解析法について論じている。まず第 2 章で誘導した材料非線形解析のためのコンクリート梁・柱要素を用いた、軸力と 1 軸曲げをうける場合の大変形解析手法について記述し、更に、補強材の付着すべり作用をも取り入れた大変形領域における非線形解析手法を提示している。次いで、この方法を軸力と 2 方向曲げ、およびねじりを受けるコンクリート梁・柱部材へ拡張し、更に、部材のねじり剛性の算定法を示すとともに、ポストピーク挙動を追跡することが可能な弧長増分法による解析手法について論じている。また、若干の数値計算例を掲げ、既往の RC、PC 試験体の実験結果との比較、ならびにモデル試験体の解析結果の考察を行って、本解析法がこの種の梁・柱部材のポストピーク領域を含む広い範囲にわたる大変形挙動を、良好に追跡し得る有用な手法であることを明らかにしている。

第 5 章においては、以上の各章で得られた知見について総括し、本研究のまとめと今後の研究課題を述べている。

これを要するに、著者はファイバー要素を用いた新たなコンクリート梁・柱部材の補強材の付着すべり作用を考慮した場合の非線形解析法を展開し、これまで未整備であったこの種の部材のチモシェンコ梁理論に基づく材料非線形解析法、およびポストピーク挙動を含む大変形領域における材料非線形解析法を開発したもので、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。