

補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート床板の 非線形挙動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

鉄筋コンクリート(RC)構造は、全く異質な材料である鉄筋とコンクリートから構成されているが、この両者が一体となり作用することを前提に成立している典型的な複合材料の一種である。この種の構造において鉄筋とコンクリートの間に付着すべり作用が発生することは古くから知られているが、この現象を RC 構造の曲げ理論に組み込むことは極めて困難であることと、理論を構築する際の簡略化のため、今日における設計理論体系自体も、両者が一体化して作用する完全付着の仮定に基づいて構築されている。

通常の RC 構造では、限界耐力に近い高荷重領域における RC 梁・柱接合部などの特殊な条件下以外、鉄筋の付着すべり作用そのものが構造体の力学挙動に大きな影響を及ぼすことは殆どないが、最近では 2 次元・3 次元有限要素法による RC 梁、柱の材料非線形解析のみならず、曲げ理論に基づく梁要素による解析においても鉄筋の付着すべりを考慮に入れた解析研究が広く行われるようになってきている。

しかしながら、RC 床板の場合、鉄筋の付着すべりを考慮した解析法については、弾性領域における研究が 2, 3 報告されているのみであり、材料非線形領域をも取り扱うことが出来る研究は、一方向 RC 床板に関する研究が幾つか散見される程度で、二方向床板に関する報告は殆ど見当たらないのが現状のようである。この事実は、RC 床板の場合、梁や柱部材と比較すると部材厚が遥かに小さいため、鉄筋のすべり効果が梁等とは比較にならないほど大きくなるであろうことを考慮すると、極めて奇異であると言わねばならない。なぜならば、RC 床板では過去に、周辺を強固な梁で支持された RC 床板に、通常の使用荷重下において、拘束端部上端に生じたコンクリートの亀裂の発生に起因して、鉄筋の拔出しが原因と考えられる床板のたわみ障害の例が数多く発生しているからである。

以上述べたような、RC 床板に発生する鉄筋の付着すべりを考慮すると同時に、スパン長に対し板厚の小さな床板において特に顕著となる幾何学的非線形性の影響や、逆に板厚の大きな床板において無視できなくなる面外せん断変形の影響までを考慮した研究は過去に殆ど行われておらず、RC 床板のより合理的な設計手法の開発のためには、これらの現象をすべて取り扱える材料非線形解析手法を確立する必要がある。

本論文は、補強材の付着すべり作用を始めとした、幾何学的非線形性や面外せん断変形の影響を考慮した短期材料非線形挙動解析手法を開発することを目的として行った研究で、全 5 章から構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の背景となる、RC 床板の設計基準の現状やその原因となった過去の大たわみ問題などについて述べ、RC 床板において補強材の付着すべりの影響を考慮する必要性を述べる。また既往の RC 床板に関する研究を、付着すべり、面外せん断変形、大変形について考慮したものそれぞれについて概観し、最後に以上の背景の下、本研究の目的とその概要を示す。

第2章においては、補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート床板の、微小変形理論に基づく材料非線形解析手法について述べる。まず材料非線形解析のための RC 床板の全ポテンシャルエネルギー汎関数を導き、その関係を用いて定式化を行った。また本解析において用いるためのコンクリートと補強材の材料性状、また付着すべり特性を設定した。更に本解析手法の妥当性を検証するため、合計5種（アンボンド PC 梁、4 隅点支持正方形床板、長方形単純支持床板、斜め直交方向配筋の床板を含む2方向単純支持正方形床板、片持ち床板）の実験例について、補強材に付着すべりを許した場合と完全付着を仮定した場合の両方について解析を行った。その結果付着すべりを考慮した本解析手法がこれらの床板の変形挙動を高い精度で表現可能であり、特に片持ち床板においては付着すべりの影響が顕著となることを示した。

第3章1節では、スパン長に比較して板厚の大きい床板において問題となる「面外せん断変形」の影響を考慮した解析手法について記述する。まず、微小変形の仮定の下、Reissner 理論に基づき RC 床板の主要な構成要素であるコンクリートの面外せん断変形の影響を考慮し、弾性領域における鉄筋コンクリート床板の有限要素解析手法について述べた。即ち、第2章と同様にまずこの問題のための全ポテンシャルエネルギー汎関数を導出し、これを用いて定式化を行った。また面外せん断変形を考慮したことによる弾性状態の床板への影響について調べるため、片持ち床板、周辺固定床板、中央部薄肉板についてそれぞれ板厚、付着係数を変化させて計算を行い、①板厚の大きな床板ほど面外せん断変形の影響を考慮した場合と曲げ変形のみ考慮した場合との差が大きくなること、②弾性状態においては付着係数を変化させたことによる差はほとんど生じないこと、③本解析手法は等厚板だけでなくドロップパネル形状を有する床板についても有効であること、を示した。また第2節においては面外せん断変形を考慮した材料非線形解析のための定式化を行い、コンクリートの応力-歪構成則を3軸応力状態で評価する手法について述べた。この解析手法を用いて、薄板・厚板双方における面外せん断破壊現象を表現するための試みとして若干の数値計算を行った。その結果、本解析値は、既往の実験曲線を比較的良好に追跡することが可能であるが、極厚の床板の問題や板の押し抜きせん断現象の再現性における整合性は未だ十分ではなく、本解析法自体に更なる改良を加える必要があることが明らかとなった。

第4章では、周辺固定 RC 床板に発生する圧縮膜によるドーム効果と、その後の引張膜作用効果、更には鉄筋の抜け出しの影響をも適切に評価することを目的として、補強材の付着すべりを考慮した RC 床板の大変形（幾何学的非線形）・ポストピーク挙動を含む材料非線形解析手法について論じている。まず、第2,3章において採用した矩形要素ではなく、1要素を1平面として扱う事ができ平行移動・回転の取り扱いが容易な三角形曲げ要素を用いてこの問題に対する有限要素法への定式化を行った。続いて第2章において導いた微小変形理論に基づく材料非線形解析手法をそのまま用いることにより大変形挙動を表すことが可能な Updated Lagrangian 法に基づく大変形解析手法について述べた。更に、本大変形解析手法の妥当性を検証するため、周辺を拘束され、ポストピーク領域に至るまで載荷を行った3種の RC 床板の実験例を元に、それぞれについて大変形解析と微小変形の仮定に基づく解析、補強材の付着すべり条件を変化させた解析を行った。その結果、①補強材に付着すべりを許した場合の解析値は完全付着を考慮した解析値よりも高い精度で実験値を追跡可能であること、②微小変形理論による解析値は荷重ピーク値が実験値・大変形解析値の両方を大幅に上回るだけでなく、膜力が圧縮から引張りへと移行することにより荷重が一旦低下した後に再び上昇するポストピーク挙動を表現することは不可能であるが、大変形解析はこれらの現象を良好に追跡可能であること、③周辺の拘束度が高い床板ほど実験値と解析値の一致の度合いが高いこと、を示した。

最後に第5章では、各章について結語を記して本研究の総括とし、今後の研究課題と方向性について示した。

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	緑川光正
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鉄筋コンクリート床板の 非線形挙動解析に関する研究

鉄筋コンクリート(RC)構造において、鉄筋とコンクリート間に付着すべり作用が生ずることは古くから知られているが、この現象を RC 構造の曲げ理論に組み込むこと自体が極めて困難であったことから、現在広く使用されている RC 床板の設計理論体系自体も、両者が一体として作用する完全付着の仮定に基づいて構築されているのが現状である。

広く知られているように、通常の RC 構造では、高荷重領域においてせん断応力度が高くなる RC 短柱や RC 梁・柱接合部などの条件下以外では、鉄筋(補強材)の付着すべり作用そのものが構造体の力学挙動に大きな影響を及ぼすことは少ないが、最近では 2 次元・3 次元有限要素法による RC 梁、柱の材料非線形解析のみならず、曲げ理論に基づく梁要素による解析においても補強材の付着すべりを考慮に入れた解析研究が広く行われるようになっている。

しかしながら、RC 床板の場合、撓み量に及ぼす付着すべり作用の影響が、梁や柱部材に比較して遥かに大きくなるにも拘らず、この作用を考慮した解析法については、弾性領域における研究が 2, 3 報告されているのみに過ぎない。また、材料非線形領域をも取り扱うことが出来る研究は、一方向 RC 床板に関する研究が幾つか散見される程度で、二方向床板に関する報告は殆ど見当たらないのが現状である。

本論文は、補強材の付着すべりを考慮した RC 床板の微小変形領域における曲げ変形挙動、またこれに面外せん断変形の影響を考慮した場合、更にはポストピーク領域を含む大変形問題をも取り扱うことが可能な短期材料非線形挙動解析手法を開発することを目的として行った研究で、全 5 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景となる RC 床板の設計基準の現状やその原因となった過去のたわみ問題などについて論及し、RC 床板において補強材の付着すべりの影響を考慮することの必要性を指摘している。また既往の RC 床板に関する解析的研究について概観し、本研究の目的とその概要について記述している。

第 2 章においては、補強材の付着すべりを考慮した鉄筋コンクリート床板の微小変形理

論に基づく材料非線形解析手法について記述している。まず材料非線形解析のための RC 床板の全ポテンシャルエネルギー汎関数を導き、その関係を用いて有限要素法への定式化を行っている。そして更に、既往の RC 床板の実験例との比較を行って、微小変形領域における本解析手法の妥当性を明らかにしている。

第 3 章 第 1 節では、スパン長に対する板厚の比が比較的大きな床板において問題となる「面外せん断変形」の影響を考慮した解析手法について記述している。まず、微小変形の仮定の下、Reissner 理論に基づき RC 床板の主要な構成要素であるコンクリートの面外せん断変形の影響を組入れ、補強材の付着すべりをも考慮に入れた弾性領域における鉄筋コンクリート床板の有限要素解析手法の展開を行った。更に、数種の RC モデル床板の数値計算例を示して、補強材の付着すべりがせん断変形の影響を考慮した RC 床板の弾性力学性状に及ぼす影響を明らかにしている。また第 2 節においては、第 1 節で展開した弾性解析法を材料非線形領域をも取扱うことが可能なように拡張し、更に、既往の実験床板数種を対象にした実験値と解析値との比較・考察により、本解析法の適合性の範囲を明らかにしている。

第 4 章では、周辺固定 RC 床板に発生する圧縮膜力によるドーム効果と、その後の引張膜作用効果、更には周辺梁などの拘束部分からの鉄筋の抜け出しの影響をも適切に評価することを目的として、補強材の付着すべりを考慮した RC 床板の大変形(幾何学的非線形)・ポストピーク挙動を含む材料非線形解析手法について論じている。まず、微小変形理論に基づく材料非線形解析手法をそのまま用いて大変形挙動を表すことが可能な Updated Lagrangian 法に基づく大変形解析手法の展開を行っている。更に、本解析手法の妥当性を検証するため、大変形の影響が顕著となる「周辺が強固に拘束された既往の RC 床板」の載荷実験例数種を対象にして、本解析値と実験結果との比較・検証を試みている。その結果、本大変形解析手法は、初亀裂の発生後、板内に発生する圧縮膜力によるドーム効果、変形が進行することに伴う膜力の圧縮側から引張り側への移行と耐荷力の顕著な低下現象、さらには再び耐荷力が増大していくポストピーク挙動を良好に追跡可能であることを明らかにしている。

第 5 章では、各章について結語を列記して本研究の総括とし、今後の研究課題と方向性について記述している。

これを要するに、著者は、これまで殆ど研究例の見当たらない補強材の付着すべりを考慮した RC 床板の材料非線形ならびに幾何学的非線形解析手法を展開し、既往の実験結果との比較によってその適合性を検証したものであり、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。