

補強材の付着すべりを考慮したコンクリート構造部材の 力学性状に関する理論的研究

学位論文内容の要旨

本論文は、既往の有限要素解析において多用されているボンド・リンクのような“数値計算上のテクニック”としてではなく、補強材とコンクリート間の付着すべり作用そのものを解析理論に直接組み入れた場合の、コンクリート構造部材、即ち、① 直線配筋を有する RC 棒、梁、および床板と、② 曲線テンドンを有する PC 梁並びに床板のためのより適用性の広い解析手法を確立するために行った研究で、全 8 章より構成されている。

第 1 章においては、本研究の背景と現状について述べ、更に、コンクリート構造部材の解析手法に関する既往の研究を概観して問題点を指摘し、本論文の目的と範囲を定めて、研究の概要を記述している。

第 2 章では、コンクリート構造における、補強材とコンクリート間の付着すべりに係わる問題のうちでも、最も基本的な問題である。“軸方向力のみを受ける鉄筋コンクリート棒部材”の 1 次元付着すべり解析を行うための手法について論じている。まず、コンクリート部分の変位、および鉄筋とコンクリート間の相対変位を基本独立変数に選んだ場合の、RC 棒部材のための全ポテンシャル・エネルギー汎関数を求め、変分原理を用いてこの問題を支配する基礎微分方程式を導いている。次いで、ここで得た微分方程式を変形することにより、周知の“1 次元基本付着方程式”が容易に導かれることを示して、本解析手法の理論的位置付けを明らかにしている。また、前掲の全ポテンシャル・エネルギー汎関数に基づき、高・低次 2 種の変位関数を用いて有限要素法への定式化を行い、数種のモデル試験体の数値計算例を掲げて、両要素解に及ぼす要素分割数の影響を調べ、既往の理論解との比較・検討により本有限要素解の妥当性を検証している。

第 3 章では、第 2 章で展開した鉄筋とコンクリート間の付着すべり問題のための基本的な考え方を、弾性領域にある RC 梁の曲げの問題に適用することについて論じている。まず、補強筋とコンクリート間の付着すべりを考慮した場合の、軸力と曲げを受ける RC 梁部材のための微小変形理論による全ポテンシャル・エネルギー汎関数を導き、この汎関数と変分原理により従来

明らかにされていなかった「補強筋の付着すべりを厳密に考慮に入れた場合」の RC 梁の基礎微分方程式を誘導している。次いで、高次および低次の 2 種の変位関数要素を用いて有限要素法への定式化を行い、線形領域における数種のモデル RC 梁の数値計算例を示して両解の精度を比較・検討したのち、付着係数の大きさが梁の曲げ性状に及ぼす影響等を明らかにしている。

第 4 章では、補強筋とコンクリート間の付着すべりを考慮した場合の、弾性領域にある RC 床板の曲げについて論じている。まず、1) 微小変形理論による「 x 、 y 直交配筋を有する RC 床板」のための全ポテンシャル・エネルギー汎関数を求め、変分原理を用いて補強筋の付着すべりを考慮した場合の RC 床板の曲げを支配する基礎微分方程式を導き、2) 理論の適用範囲を微小変形領域から幾何学的非線形領域にまで拡張して、有限変形理論に基づく「 x 、 y 直交配筋を有する RC 床板」のための基礎微分方程式を導いている。次に、これらの理論に基づき、鉄筋の配筋方向が直交 x 、 y 2 方向のみならず、任意の方向を有する場合をも取り扱い得るように拡張して有限要素法への定式化を行い、それぞれ微小変形理論、および有限変形理論による RC 床板のための有限要素方程式を誘導している。最後に、以上で展開した両理論による有限要素解析法を用いて、2、3 のモデル RC 床板の数値計算を行い、補強材の付着すべりが、それぞれの領域における RC 床板の力学性状に及ぼす影響について明らかにしている。

第 5 章では、テンドンとコンクリート間に付着すべりを考慮した場合の、曲線形状テンドンを有するポストテンション PC 梁部材の弾性曲げについて論じている。まず、テンドンの緊張力と曲げを受ける曲線テンドンを有する PC 梁の、微小変形理論による全ポテンシャル・エネルギー汎関数を導き、テンドンの緊張時からグラウチング完了後の梁の挙動までを一貫して取り扱い得る PC 梁のための基礎微分方程式を誘導している。次いで、有限要素法への定式化を行い、原汎関数に忠実に従う“厳密な有限要素方程式”と、近似仮定を導入した“簡略化有限要素方程式”の 2 種を導いている。最後に、ここで展開した 2 種の有限要素解を用いて、2、3 の PC 梁の数値計算例を示して両解の適合性を検証し、テンドンの曲線形、及び付着係数の大きさが PC 梁の力学性状に及ぼす影響、緊張力導入時の解析例、等について検討・考察をくわえている。

第 6 章では、テンドンとコンクリート間に付着すべりを考慮した場合の、“曲線テンドンを有する PC 床板”の弾性曲げの問題について論じている。テンドンが直交する x 、 y 2 方向にそれぞれ滑らかな曲線を描いて配置されている場合の、微小変形理論による PC 床板の全ポテンシャル・エネルギー汎関数を求め、変分原理を用いて PC 床板のための基礎微分方程式を求めている。次いで、前項の理論をより一般化するため、各テンドン層の配置方向が直交する x 、 y 2 方向のみならず、それぞれが任意の方向を有する場合にも対処し得るように、さらに、板厚がドロップ

パネル状に変化する「変厚床板」をも矛盾なく取り扱い得るように拡張して有限要素法への定式化を行い、より適用性の広い PC 床板のための有限要素方程式を導いている。最後に、我が国の建築の分野では、その設計環境が殆ど未整備の状態にある“フラットタイプの PC スラブ”を取り挙げ、数種のモデルスラブの数値計算例を掲げて、この種の PC スラブの力学性状について検討・考察を加えている。

第 7 章では、第 2 章から第 6 章までにおいて展開してきた“弾性領域”における、補強材の付着すべりを考慮に入れたコンクリート構造部材のための有限要素解析法を、コンクリートの亀裂や補強材の降伏を伴う“材料非線形領域”にまで拡張することを意図して、その最も基本的な問題への拡張・適用を試みている。まず、鉄筋コンクリート構造部材における材料非線形付着すべり問題の最も単純な例として、軸方向力のみを受ける RC 棒部材を対象にして、荷重の増大とともに、コンクリートに断続的に生じる亀裂と、これに伴う亀裂幅の拡大の様相を、計算を中断することなしに連続して追跡し得る新たな解析手法の開発を行った。次いで、RC 棒部材のために展開したこの基本手法を、曲げを受ける RC 梁部材の材料非線形解析にも適用し得るように拡張し、亀裂発生後の引張り側コンクリートの剛性を低減するための簡略化手法を導入し、亀裂発生後の補強筋の付着すべり作用を含む梁の挙動を、より実際に近い形で追跡することが可能な解析手法を提案している。最後に、ここで述べた「RC 棒部材」と「RC 梁部材」のそれぞれについて若干の数値計算例を示し、既往の実験結果との比較・検討により、個々の解析手法の妥当性の検証を行っている。

第 8 章においては、本論文の各章で得た結果を総括し、本研究に引き続いて進展させるべき今後の研究課題とその方向について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査	教 授	内 山 武 司
副 査	教 授	小 幡 守
副 査	教 授	柴 田 拓 二
副 査	教 授	角 田 與史雄
副 査	教 授	佐 伯 昇
副 査	教 授	井 野 智

鉄筋コンクリート(以下, RC と略記) 及びプレストレストコンクリート (以下, PC と略記) 構造は, コンクリートと鋼と言う異種材料から構成された複合材料で, 一体となって変形する際, 異種材料間の界面で付着すべり現象を生じ, 補強材の付着すべりを考慮したコンクリート構造の解析手法を確立することは, その力学性状を明確に把握する上で重要な問題となっている。

本論文は, これまで十分に体系化されていなかった RC, PC 部材の付着すべり現象を考慮した解析手法を提案したもので, 成果は以下の通りである。

第1章では, 主題の背景と現状を記述し, コンクリート構造部材の解析手法に関する既往の研究を概観して問題点を指摘し, 本論文の目的と範囲を述べている。

第2章では, コンクリート構造物における補強材とコンクリート間の付着すべり問題の内, 軸方向力を受ける RC 棒部材の解析手法を論じている。コンクリート部分の変位, 及び鉄筋とコンクリート間の相対変位を独立変数に選んだ全ポテンシャル・エネルギー汎関数 (以下, 汎関数と略記) と基礎微分方程式の誘導, 得られた方程式から1次元基本付着方程式が導かれることを示し, 本解析手法の理論的位置付けを明らかにしている。汎関数から高・低次2種の変位関数を用いた有限要素法への定式化を行い, 両要素解に及ぼす分割数の影響, 既往解との比較・検討により本方法の妥当性を検証している。

第3章では, 前章で展開した解析手法を, 弾性領域にある RC 梁の曲げの問題へ適用することについて論じている。軸力と曲げを受ける RC 梁部材について微小変形理論に基づく汎関数を導き, 従来明らかにされていなかった補強材の付着すべりを考慮した厳密な形の基礎微分方程式を誘導している。高・低次2種の変位関数を用いて有限要素法への定式化を行い, 線形領域における両解の精度を比較・検討し, 梁の曲げ性状に及ぼす付着係数の影響, 等を明らかにしている。

第4章では、弾性領域にある RC 床板の曲げ問題を論じている。先ず、補強材の付着すべりを考慮した微小変形理論に基づく RC 床板の汎関数と基礎微分方程式、更に幾何学的非線形領域に拡張した有限変形理論に基づく基礎微分方程式を導いている。これらの理論に基づき、任意方向の配筋を有する RC 床板を対象とした有限要素法への定式化を行い、解析例から微小・有限変形領域における RC 床板の力学性状に及ぼす補強材の付着係数の影響を明らかにしている。

第5章では、曲線形状のテンドンを有するポストテンション PC 梁部材の曲げ問題を論じている。テンドンの緊張力と曲げを受ける PC 梁について、微小変形理論に基づく汎関数、更に緊張時からグラウチング完了後の挙動までを扱い得る基礎微分方程式の誘導と有限要素法への定式化を行い、汎関数に従う厳密な形の有限要素式と近似仮定を導入した簡略化有限要素式の両式を導いている。PC 梁の解析例から両解の適合性を検討し、更にテンドンの曲線形状、及び付着係数の太きさが PC 梁の力学性状に及ぼす影響、緊張力導入時の解析、等について検討・考察を加えている。

第6章では、曲線テンドンを有する PC 床板の曲げ問題を論じている。先ず、テンドンが直交する滑らかな曲線を描いて配置された床板について微小変形理論による汎関数と基礎微分方程式、更に一般化した任意方向配筋、また板厚がドロップパネル状に変化する変厚床板も扱い得るように拡張した有限要素法への定式化を行い、適用性の広い有限要素式を導き、我が国の建築分野で設計環境が殆ど未整備状態にあるフラットタイプの PC 床板を解析例として取り上げ、力学性状についての検討・考察を加えている。

第7章では、第2章から第6章までにおいて展開してきた弾性問題を、コンクリートの亀裂や補強材の降伏に伴う材料非線形問題へと拡張している。軸方向力を受ける RC 棒部材について、荷重の増大に伴ってコンクリートに生ずる亀裂と、その伸展状況等を追跡し得る解析手法の開発、更に曲げを受ける RC 梁部材を対象とした、亀裂発生後の引張側コンクリートの剛性を低減するための簡略化手法と、補強材の付着すべりを含む挙動を追跡し得る手法を提案し、既往の実験結果との比較・検討から解析手法の妥当性を検証している。

これを要するに、本論文は鉄筋コンクリート及びプレストレストコンクリート部材で、補強材とコンクリート間の付着すべり問題を付着係数を用いて体系的に表現した解析手法として工学的有用性が高く、より複雑な構造部材への拡張を可能としたもので、建築・土木構造学に寄与するところで大である。

よって、著者は博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。