

学 位 論 文 題 名

3次元非線形有限要素法による
コンクリート系部材の挙動解析に関する研究

学位論文内容の要旨

今日の社会基盤構造物には、長期耐用性、経済性、地球環境への低影響性と従来とは比べようもない多くの要求がなされている。そのため構造物の形式や使用材料の多様化が進み、設計法ももはや構造物の構造細目を規定する仕様規定型では対応しきれず、構造物の満たすべき性能を規定するより合理的な性能規定型に移行しつつある。現在ある多数の解析法の中において、その成熟度や、精度、また手法自体が持つ問題やその適用限界についても明らかになりつつある有限要素法は将来、設計に有効に用いることのできる解析手法として現在最も現実的な方法であるといえるが、このような将来の性能照査型設計への有限要素解析の適用を考える時、2次元解析に比べより適用範囲が広く、耐久設計・経済設計において考慮すべき3次元的な環境作用を取り扱うことのできる3次元解析が今後の研究対象として重要であることは明らかである。しかし近年、パーソナルコンピュータ上での3次元大規模非線形解析すら可能な研究環境が整いつつある中、なお2次元解析が数値解析を用いた研究の主流となっているのが現状である。そこで本研究ではこのような将来の設計への適用を踏まえ、ひび割れ後のコンクリート系部材の挙動を扱うことのできる3次元有限要素解析プログラムの構築を行い、それを用いてコンクリート系部材の解析を行った。

本論文は全6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景と目的、本研究で開発した解析プログラムの概要について述べた。

第2章では、コンクリート材料モデルの開発を行った。本研究で目指す解析プログラムは将来的に実設計に反映できるものを目指しており、開発するコンクリートモデルはなるべく平易かつ精度を有する構成モデルを汎用性の高い方法によって組合せる必要がある。そこで、重ね合わせによる方法で多方向ひび割れを表現し、1方向、2方向における圧縮、引張、せん断などの既往の構成モデルを組合せてモデルを構築することで、要求される性能を実現することを試みた。またモデルを構築する際、繰返し挙動解析など、ひび割れが3本以上発生する繰返し挙動に対して重ね合わせ法によるモデルが適用範囲外であることが確認された。その問題に対処するために、さらにアクティブクラック法を用いたモデルの開発も併せて行った。既往のアクティブクラック法は、非直交ひび割れが同時に開くような場合についての適用性についてまだ良くわかっていない。そこで本研究では、他方向のひび割れに基づいて計算したせん断剛性を用いる等の変更を行い、これを考慮できるようにした。

第3章では、第2章で開発したコンクリートモデルを用いて要素レベルの各種検証解析を行

った。まず、3 軸圧縮、棒部材 1 軸引張、RC パネル純せん断などの解析を行った。そのなかで、本プログラムの妥当性が確認されると共に、岡村らのテンションスティフニングモデルにおいて、ひび割れ分散性により付着特性係数を変化させて適用しなければならない適用性の問題や RC パネルの純せん断解析においては荷重制御であるべきことなどを確認した。次に、非直交多方向ひび割れを伴う RC パネルの単調載荷、繰返し載荷解析を行い、非直交ひび割れを対象とした本コンクリートモデルの総合的検証を行った。ひび割れ 2 本発生下の単調載荷解析では、重ね合わせモデルの妥当性が示された。また、ひび割れが 3 本発生する繰返し挙動解析では、アクティブクラック法を使用した繰返しモデルでは、構成則において簡易的な除荷、再載荷曲線、圧縮・引張モデルの結合ルールを用いたことにより、内部履歴が実験値に比べ若干異なること、またひび割れ発生後の剛性が多少低いことなどが確認されたが、全体的に概ね一致した挙動を示しており、モデルの妥当性が確認された。

第 4 章では鉄筋コンクリート棒部材のねじり解析を行った。従来の解析手法では、仮定の下に部材挙動を 1 次元、2 次元にモデル化して行っていたが、3 次元有限要素法を用いることにより部材挙動を直接予測することができる。本プログラムによるねじりトルク関係は概ね実験結果に一致し、破壊性状についても、一般的な破壊性状にほぼ一致する結果を得た。また、3 次元有限要素解析では、部材内部の任意時点での応力・ひずみ状態を得ることができる。この特徴を活かして、部材の応力・ひずみ状態と部材断面との形状の関係について調べた。その結果、断面内のせん断応力の局所化領域、即ちせん断流の幅をウェブ厚として部材を中空化しても中実断面部材とほぼ同等の耐荷性能を持つことを確認した。またねじりトルク関係において、部材内部のコンクリートで 2 本目のひび割れが発生するため、この 2 本目のひび割れが部材挙動に与える影響について調べたところ、ひび割れ発生後の剛性と耐力を非常に大きく計算することから、ひび割れ 2 本以上の考慮が必要であることが確認された。

第 5 章では、鋼板とコンクリートが一体となった面部材である鋼コンクリート合成床版の押抜きせん断解析を行った。3 次元的な破壊進展を伴い、複雑な耐荷機構を示すこの破壊挙動を、3 次元非線形有限要素法によって予測することを試みた。本形式の部材では、鋼板とコンクリートとのモデル化が解に大きな影響を与える。そこで鋼板とコンクリートとの接合面を剛結としたものと、接合部のスタッドジベルをモデル化し接合要素として導入したものとを比較解析を行い、この種の部材解析における接合要素導入の重要性を示すとともに、接合要素のモデル化についても、異なったアプローチから構築されたモデルの比較解析を行うことで、鋼コンクリート剛性梁の曲げ試験などよりスラブ内のスタッド環境に近い挙動に基づき、コンクリートのみならず鋼板、スタッドの物性値をパラメータとするモデルの構築がなされるべきであることを示した。このようにモデル化された接合要素を用いた解析において、荷重変位関係や破壊性状は実験値と良く一致する結果が得られた。また 3 次元有限要素解析の特徴である任意位置での応力状態を観測できることから、実験では捕らえることの困難な、せん断破壊時における最下部周辺のコンクリート応力軟化が観察された。本章において 3 次元非線形有限要素法をコンクリート系面部材の押抜きせん断挙動予測に適用できる可能性が示された。今後より多くの検証と精度向上により上記のような応力状態を把握できる特徴を活かすことで、破壊機構の解明、設計式の構築などに貢献できるといえる。

第 6 章では本論文のまとめを行った。

学位論文審査の要旨

主査	教授	角田	興史雄
副査	教授	三上	隆
副査	教授	城	攻
副査	教授	大沼	博志
副査	助教授	上田	多門

学位論文題名

3次元非線形有限要素法による コンクリート系部材の挙動解析に関する研究

本論文は、同時に3方向のひび割れの考慮が可能な3次元非線形有限要素解析プログラムを独自に開発し、鉄筋コンクリートおよび鋼コンクリート部材を解析し、3次元挙動に関する新たな知見を得たものである。コンクリート系部材を3次元解析する場合、多方向に発生するひび割れを適確にモデル化する必要があるが、現時点では、その手法は確立されていない。本論文は、既往のモデル化手法の問題点を改良した新たなモデルを提示し、その手法の妥当性を実験結果と比較することにより明らかにしている。3次元解析が必要な棒部材のねじり挙動と、面部材の押抜きせん断挙動の解析を行い、実験では判明しにくい部材の抵抗機構を新たに明らかにし、より合理的な耐力算定法の確立に資する知見を提供している。

本論文は全6章から構成されており、各章の内容は以下のようである。

第1章では、本研究の背景と目的、本研究で開発した解析プログラムの概要について述べている。

第2章では、コンクリート材料モデルの開発を行っている。実設計に反映できるものを念頭に置き、平易かつ精度を有する構成モデルを汎用性の高い方法によって組合せることによって、コンクリートモデルを開発している。第一の方法として、重ね合わせによる方法で多方向ひび割れを表現し、1方向、2方向における圧縮、引張、せん断などの既往の構成モデルを組合せてモデルを構築している。ただし、繰返し挙動解析など、ひび割れが3方向以上発生する繰返し挙動に対しては、重ね合わせ法によるモデルが適用範囲外であることを示している。その問題に対処するために、第二の方法としてアクティブクラック法を用いたモデルの開発も併せて行っている。既往のアクティブクラック法は、非直交ひび割れが同時に開くような場合についての適用性について明らかにされていないが、本論文において、基準となるアクティブクラック以外の他方向のひび割れに基づいて計算したせん断剛性を用いる等の改良を施し、適用範囲を広げている。

第3章では、第2章で開発したコンクリートモデルを検証するために、要素レベルの各種解析を行い、実験結果と比較している。3軸圧縮、棒部材1軸引張、RCパネル純せん断などの解析を

行うことにより、本コンクリートモデルの妥当性を確認すると共に、既往のテンションスティフニングモデルにおいて、ひび割れ分散性により付着特性係数を変化させて適用しなければならない点や RC パネルの純せん断解析においては荷重制御であるべきことなどを示している。次に、非直交多方向ひび割れを伴う RC パネルの単調載荷、繰返し載荷解析を行い、非直交ひび割れを対象とした本コンクリートモデルの総合的検証を行っている。その結果、2 方向にひび割れが発生した状況下の単調載荷解析で重ね合わせモデルの妥当性を示し、ひび割れが3 方向に発生し繰返し荷重を受ける場合の挙動解析によりアクティブクラック法を使用した繰返しモデルの妥当性を示している。合わせて、構成則において簡易的な除荷、再載荷曲線、圧縮・引張モデルの結合ルールを用いたことにより、内部履歴が実験値に比べ若干異なること、またひび割れ発生後の剛性が多少低いことなどの問題点も指摘している。

第4章では鉄筋コンクリート棒部材のねじり解析を行っている。本解析により推定されるねじりトルク関係は概ね実験結果に一致し、破壊性状についても、一般的な破壊性状にほぼ一致する結果を得ることを示し、解析結果の信頼性をまず明らかにしている。次に、3 次元有限要素解析の特徴である、部材内部の任意の地点、任意の時点での応力・ひずみ状態に関する情報を用い、部材の応力・ひずみ状態と部材断面との形状の関係について新たな知見を示している。すなわち、断面内のせん断応力の局所化領域、即ちせん断流の幅をウェブ厚として部材を中空化しても中実断面部材とほぼ同等の耐荷性能を持つこと、および、部材内部のコンクリートにおける2 方向目のひび割れが、ひび割れ発生後のねじり剛性と耐力に大きな影響を及ぼしていることを明らかにしている。

第5章では、引張縁に配置された鋼板とコンクリートとが一体となった面部材である鋼コンクリート合成床版の押抜きせん断解析を行っている。鋼板とコンクリートとの接合面を剛結としたものと、接合部のスタッドジベルをモデル化し接合要素として導入したものとの比較解析を行い、この種の部材挙動における接合要素のモデルの重要性を示している。接合要素のモデル自体についても、異なった力学的条件によって得られた接合部モデルを用いた比較解析を行うことで、鋼コンクリート合成梁の曲げ試験など、床版内のスタッド環境に近い条件で得られたモデルとする必要があること、コンクリートの材料定数のみならず鋼板、スタッドの寸法をパラメータとするモデルの構築がなされるべきであることを示している。このように適確にモデル化された接合要素を用いた解析を行えば、荷重変位関係や破壊性状は実験値と良く一致する結果となることを明らかにしている。さらに、3 次元有限要素解析の特徴である任意位置での応力状態の観測結果に基づき、実験では捕らえることの困難な、せん断破壊時における最下部周辺のコングリート応力軟化が耐力を決定する要因であることを示している。

第6章では本論文で明らかにされた点をまとめて示している。

以上から、本論文は、鉄筋コンクリートおよび鋼コンクリート構造物のより汎用的な解析に不可欠な3 次元数値解析手法を開発するとともに、ねじりおよび押抜きせん断といった3 次元的挙動に対する新たな知見を明らかにするなど、独創的な研究成果を挙げており、構造工学およびコンクリート工学の発展に貢献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。