博士（工　学）　田　所　敏　弥

学位論文題名

ひずみ軟化構成則の構築と有限要素法による鉄筋コンクリート部材の終局挙動の解明に関する研究

学位論文内容の要旨

コンクリート構造物の設計が性能照査型へ移行しつつある現在，構造物を合理的に設計可能な数値解析の重要性が再確認されている．有限要素法を中心とした昨今の高度な非線形解析技術の進歩はめざましく，近い将来，地震力とともに他の力学作用や環境作用に対するコンクリート構造物の性能照査手法として重要な役割を演ずることになるものと期待されている．しかしながら，現時点では，十分な信頼性を持って様々な性能を照査できるとは言えず，さらなる発展が求められている．古典的理論および実験により導かれた経験式に基づく設計方法によれば，得られる解（構造物の性能）に違いが現れにくい．しかし，非線形解析を用いる場合，得られる解は，解析手法，モデル化，要素の種類，要素の形状，構成則およびその組合せ方等により大きく異なる．特に，構成則およびその組合せ方が解析解に及ぼす影響は大きい．本研究では，各種要因の影響を考慮しつつ，終局状態まで適応可能なコンクリート構成則，特にポストピーク挙動に大きな影響を与える引張軟化，圧縮軟化，せん断軟化に関する構成則の構築を主眼に行った．ひずみ軟化のモデル化を行うことにより，有限要素法が困難とする局所的および離散的な以下の終局時の破壊メカニズムを明らかにした．

(1) 終局時の圧縮軟化をともなうRCはりの曲げ破壊

(2) 2軸の圧縮軟化をともなうRCはりのせん断圧縮破壊

(3) せん断軟化をともなうせん断補強されていないRCはりの斜め引張破壊

第1章は，本研究の背景および目的について述べた．

第2章では，引張力を受けるコンクリートのモデル化において重要な破壊エネルギーと等価長さの設定方法について述べている．コンクリートにひび割れが発生するといわゆるひずみ軟化が起き，その現象は応力－変位関係で一意的に表現できることは，既往の研究によって示されている．しかし，これを有限要素法に導入するには，応力－変位関係を適切な応力－ひずみ関係に置き換えられなければならない．有限要素法の要素寸法依存性は広く知られているが，その詳細な説明は今まで行われてこなかった．本章では，コンクリートのひずみ勾配に着目し等価長さの適切な設定方法を述べた．そして，引張ひずみ場を一様引張場とひずみ勾配を有した引張場に分けることによって等価長さを設定し，部材挙動の検証を通して要素寸法依存性について検討した．曲げ部材においては，降伏荷重に等価長さが影響を与えるが，要素寸法に応じた等価長さを用いることによりその影響を低減できることを示した．また鉄筋比が1%より大きい場合は，等価長さの影響はほとんどないことを確認した．

第3章では，既往の引張・圧縮場の圧縮モデルを軟化領域をも扱えるよう拡張した．引張軟化モデルに関しては，ひび割れにひずみが局所化するため等価長さを用いて応力－変位関係を

応力－ひずみ関係に置き換えたが，同様の手法を圧縮軟化モデルに導入することができた．破壊基準に関してはコンクリートの破壊性状を考慮し，圧縮応力が支配的なひび割れと引張応力が支配的なひび割れとを区別し，圧縮破壊が支配的なひび割れの時のみ圧縮軟化が起こると仮定した．つまり，引張力よりも圧縮力が卓越した場合，1 本のひび割れが発生するのではなくコンクリートが全体的に砕けるいわゆる圧壊が起こるような場合のみ圧縮軟化を適応するものとした．さらに圧縮軟化モデルが曲げ部材の終局変形に大きく影響を与えることを示した．また，引張軟化モデル同様，圧縮軟化モデルにおいても要素寸法に応じた等価長さを用いることによって，終局変形に及ぼす要素寸法依存性を低減できることを示した．ただし，引張軟化モデルではひずみの局所化する領域がひび割れ幅として明瞭に特定できるのに対して，圧縮軟化モデルでは，ひずみの局所化する領域が不明瞭でありそのため圧縮破壊エネルギーの算定が極めて難しい．本章では，既往の要素試験より得られた圧縮破壊エネルギーを部材の解析に用いることによって概ね RC 部材の終局挙動を再現できることを明らかにした．

第 4 章では，第 3 章で軟化領域に拡張した引張・圧縮場における圧縮モデルを 2 軸圧縮場に拡張した．曲げ圧縮破壊する部材の解析においては，引張・圧縮場の圧縮軟化モデルのみが必要であり 2 軸圧縮場の圧縮軟化モデルは必要ない．しかし，ディープビームなどのせん断圧縮破壊する部材の解析を行う場合，2 軸圧縮場の圧縮軟化モデルの導入が不可欠となる．ここで，2 軸圧縮場の破壊基準を Kupfer の実験結果に従って定義した．ひび割れの進展時に消費されるエネルギーは，Kupfer の実験結果から引張・圧縮場ではひび割れ平行方向の 1 方向であるのに対し，2 軸圧縮場では 2 方向において消費されると推測できる．そこで，2 軸で消費される圧縮破壊エネルギーの和が引張・圧縮場における圧縮破壊エネルギーと等価であると仮定しモデル化を行った．その結果，斜めひび割れのせん断軟化を考慮しなくてもディープビームのせん断圧縮破壊を再現することができた．圧縮破壊エネルギーに関しても既往の要素試験レベルで検証された圧縮破壊エネルギーの算定式を用いることができることを確認した．

第 5 章では，RC 部材の一軸引張解析および曲げ解析結果に現れるひび割れおよび鉄筋のモデル化の相違を詳細に検討した．RC 部材の挙動を有限要素法により再現する場合，ひび割れの発生および進展のモデル化の方法および鉄筋のモデル化の方法が重要な課題となる．分散モデルは，平均応力－平均ひずみ関係によりコンクリートおよび鉄筋の挙動を表現する方法であり，離散モデルは，鉄筋およびひび割れを実際に近い形でモデル化する方法である．本章では，各モデルに要求されるコンクリートの引張軟化モデルの設定方法，鉄筋の降伏判定方法，材料特性値の設定方法，付着喪失区間の設定方法，付着モデルの影響について詳述した．

第 6 章では，部材試験および第 5 章で検討した離散モデルを用いて斜め引張破壊の力学的メカニズムを明らかにし，分散ひび割れモデルにおける有限要素法の問題点を示した．最近の研究において，せん断伝達面におけるひずみ軟化のモデル化が提案されているが，その力学的な背景は必ずしも明らかにされてはいない．そのため本研究では，部材試験により斜めひび割れ面の挙動を詳細に観察し伝達応力を算出した．その結果，斜め引張破壊する部材にはせん断軟化領域が存在しないこと，斜めひび割れ面のせん断伝達機構とせん断破壊モードが密接に関係することを示した．また，水平ひび割れの影響とダウエル作用の影響を考慮した離散モデルを用いた有限要素解析によって，斜め引張破壊に至る力学的メカニズムを明らかにした．

第 7 章は結論であり各章のとりまとめを行った．

学位論文審査の要旨

主　査　　教　授　　角　田　與史雄
副　査　　教　授　　三　上　　隆
副　査　　教　授　　佐　藤　浩　一
副　査　　教　授　　城　　攻
副　査　　助教授　　上　田　多　門

学位論文題名

ひずみ軟化構成則の構築と有限要素法による鉄筋コンクリート部材の終局挙動の解明に関する研究

本研究は，従来は専ら実験に依存していたコンクリート構造物の最大耐力以降の終局変位に至るまでの挙動の解明を有限要素解析により可能にしたものである．その手法は，これまで検討が不十分であった材料強度以降の軟化挙動，すなわち，コンクリートの引張軟化，圧縮軟化，せん断軟化に注目し，それらに対する新たな構成則を構築したことによっている．

第1章では，本研究に至った背景および目的について述べられている．

第2章では，コンクリートの引張軟化の構成則が，鉄筋コンクリート部材の曲げ降伏耐力に影響を与えることを示し，引張軟化構成則を適切に与えるために必要な，破壊エネルギーと等価長さの設定方法を新たに提示している．コンクリートにひび割れの発生後に生じるひずみ軟化現象を有限要素法に導入するには，ひび割れでの伝達力と変位関係を適切な応力－ひずみ関係に置き換えられなければならない．本章では，コンクリートのひずみ勾配に着目し等価長さの適切な設定方法を述べている．そして，引張ひずみ場を一様引張場とひずみ勾配を有する引張場に分けることによって各々に適切な等価長さを設定するとともに，部材の曲げ挙動の引張軟化構成則依存性を明らかにしている．また，鉄筋比が 1%より大きい場合は，等価長さの影響はほとんどないことを明らかにしている．

第3章では，コンクリートの引張･圧縮場での圧縮軟化の構成則が，鉄筋コンクリート部材の曲げ降伏後の終局変形に影響を与えることを示し，引張・圧縮場の新たな圧縮軟化および引張軟化構成則を提案している．引張軟化の構成則においては，ひび割れにひずみが局所化するため等価長さを用いて応力－変位関係を応力－ひずみ関係に置き換えるが，同様の手法を圧縮軟化構成則に導入している．破壊基準に関してはコンクリートの破壊性状を考慮し，圧縮応力が支配的なひび割れと引張応力が支配的なひび割れとを区別し，圧縮破壊が支配的なひび割れの時のみ圧縮軟化が起こると仮定している．引張軟化構成則と同様に，圧縮軟化構成則においても要素寸法に応じた等価長さを用いることによって，終局変形に及ぼす要素寸法依存性を低減できることを示し

ている．

第4章では，鉄筋コンクリート部材のせん断圧縮破壊挙動を再現するために不可欠な2軸圧縮場での圧縮軟化の構成則を，第3章で示した引張・圧縮場における圧縮軟化構成則を2軸圧縮場に拡張することによって構築している．まず，曲げ圧縮破壊する部材の解析においては，引張・圧縮場の圧縮軟化構成則のみが必要であるが，ディープビームなどのせん断圧縮破壊する部材の解析を行う場合，2軸圧縮場の圧縮軟化構成則が不可欠であることを示している．既往の実験的事実に基づき，2軸圧縮場で消費される圧縮破壊エネルギーの和が引張・圧縮場における圧縮破壊エネルギーと等価であるという新たな仮定を導入することによって，圧縮軟化構成側を構築している．解析の結果，斜めひび割れでのせん断軟化を考慮しなくてもディープビームのせん断圧縮破壊を再現できることが示されている．

第5章では，鉄筋コンクリート部材の終局挙動に大きな影響を与える鉄筋とコンクリートの合成作用により生じる引張剛性を適切にモデル化するための検討を詳細に行っている．検討対象となっている構成則のタイプは，鉄筋およびコンクリートひび割れの分散モデルと離散モデルである．本章では，各モデルに用いられる構成則を引張剛性の観点から横並びに評価し，必要なコンクリートの引張軟化構成則の設定方法，コンクリートの引張強度の設定方法，鉄筋の降伏判定方法，鉄筋の付着喪失区間の設定方法，および，付着モデルの影響が詳述されている．実現象を忠実に再現した離散モデルにより引張剛性を正確に再現できること，その結果は，より簡便であるが適用範囲に制限のある分散モデルの改良に結びつけられることを示している．

第6章では，鉄筋コンクリート部材のせん断引張破壊（斜め引張破壊）挙動を，第5章で示した離散モデルを用いて再現できることを示している．鉄筋コンクリートはりの載荷試験において，斜めひび割れ面の挙動を詳細に観察し伝達応力を算出した結果，既往の研究で言われているような斜めひび割れ面でのせん断軟化領域が存在しないこと，さらには，斜めひび割れ面のせん断伝達機構とせん断破壊モードが密接に関係することを示している．合わせて，ダウエル作用によって軸方向鉄筋に沿って発生する水平ひび割れの導入がせん断引張破壊を再現するためには不可欠であることを示すとともに，その破壊メカニズムを明らかにしている．

第7章は，第1章から第6章までの研究成果の概要を結論としてまとめている．

これを要するに、本研究は，コンクリート構造物の合理的な設計法の確立に極めて有益な、最大耐力以降の変形能力の解析を可能にするなど、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。