

氏名	野村希晶
授与学位	工学博士
学位授与年月日	平成2年10月11日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第2項
最終学歴	昭和54年3月 東北大学大学院工学研究科建築学専攻 前期2年の課程修了
学位論文題目	コンクリートの破壊進行領域における引張軟化挙動 に関する破壊力学的研究
論文審査委員	東北大学教授 杉村 義広 東北大学教授 平井 和喜 東北大学教授 柴田 明德 東北大学教授 高橋 秀明 東北大学助教授 三橋 博三

論文内容要旨

建設分野においては、在来の構造物に加え特殊なコンクリート構造物の建造が盛んに行われていること、また高強度コンクリートや繊維補強コンクリートなど性能改善の技術が高まっていることなどから、コンクリート材料の役割が今にも増して重要なものになることは想像にかたくない。このように従来の実験式や設計式の適用範囲を超えるようなコンクリート材料・構造が生まれている状況の中で、コンクリートの性能評価や力学特性の把握の手法、加えてそれらを設計に適用してゆく手法やプロセスが従来通りのままでは十分とはいえない。一方、有限要素法を代表格とする数値解析技術の発展の結果、コンクリートや鉄筋及び両者の間の相互応力伝達機構などの非線形挙動を取り入れた解析が可能になってきている。しかしこの分野での研究の積み重ねにより、未解決な問題の一因がコンクリート内部のひび割れの複雑な破壊過程周辺に残されていることが認識されてきた。コンクリートのひび割れの挙動は、準微視レベルの微細ひび割れの発生・累積・連結成長・進展（この領域は破壊進行領域と呼ばれる）から巨視レベルのひび割れ伝播に至る過程そのものであり、コンクリート構造物の非線形挙動の多くを支配する物理機構である。従来材料試験などで得られる平均化された引張破壊強度をひび割れ挙動の規範として解析に導入しても、構造物の挙動が上述のような機構に支配されている場合には、コンクリートの非線形挙動を完全には追跡できない。このような問題が顕在化している中で、新しいパラダイムとして注目されているのがコンクリー

トの非線形破壊力学である。コンクリートの引張域における破壊進行領域では、変形の増大に伴って応力が低下する引張軟化挙動が現われる。非線形破壊力学の現在の枠組みでは、破壊進行領域で消費されるエネルギーの平均値である破壊エネルギー G_f や、破壊進行領域内での引張軟化挙動の平均的な構成関係である引張軟化則によって、破壊進行領域での微細ひび割れの挙動を特徴づけようとしている。破壊エネルギー概念については、これが以前の線形破壊力学の問題、例えば線形破壊力学パラメータの寸法依存性などを合理的に説明し得る破壊力学パラメータとして有力であることが認められつつある。また、引張軟化則は、コンクリート材料や部材・構造物のひび割れ挙動を、平均応力概念によってではなく、エネルギーを考慮した破壊力学概念を取り入れた形でより合理的に解析することを可能にする。

破壊エネルギー G_f 及び引張軟化則は引張軟化挙動の破壊力学的モデルではあるが、これらと破壊進行領域の実体との関連はまだよく分かっていないのが現状である。破壊進行領域での機構がコンクリートの特性によって変化すれば、引張軟化挙動もこれに応じて変化するが、微細破壊過程内のどのような機構が引張軟化挙動の変化をもたらすかは、単に破壊エネルギー G_f や引張軟化則を評価しただけでは不明のままである。また、最近の研究では、破壊エネルギー G_f に寸法依存性があるという報告が幾つか見られており、これが破壊力学にとっては極めて深刻な問題であることから、寸法依存性がどのような原因によってもたらされるかを調べるのが重要である。また破壊エネルギー G_f の簡便で合理的な評価試験法と引張軟化則を評価するための試験法が今なお模索されているが、破壊進行領域の実体的な意味が明瞭にならない限り、その評価法自体の意味を問うべき基準は無いままである。コンクリートの非線形破壊力学の枠組みの中で現在最も重要で且つ困難な問題点は、それらの力学的概念が記述しようとする物理的な現象が、破壊進行領域と呼ばれるコンクリート内部での完全には不可視な微細破壊機構によって生じられるところにある点である。

本論文の目的は、このような破壊エネルギーと引張軟化則及び破壊進行領域に関する問題点を踏まえて、破壊進行領域と引張軟化則の関係及び破壊進行領域の機構が破壊エネルギー G_f の評価に与える影響を、幾つかの異なるアプローチから実体的に明らかにしていこうとするものである。破壊エネルギー G_f が破壊進行領域の破壊力学的評価パラメータであり、引張軟化則が破壊進行領域の力学的表現であるから、それらの関係を述べる場合、異なるレベルでの記述が必要である。破壊進行領域で生じている機構は準微視的水準から記述されなければならないという認識から、本論文では、微細ひび割れの発生・累積・連結成長・進展、及び骨材-マトリックス間の相互応力伝達（ブリッジング）などの物理的な機構を表現する準微視的な定性的語彙を用い、これらが指し示す破壊進行領域の特性と引張軟化則との関係を明らかにしようとしている。また、破壊進行領域の特性が明らかになることによって、破壊エネルギー G_f の評価の問題のうち最も重要なものの一つである寸法依存性の原因について議論することが可能になる。本論文では、引張軟化特性の変動という観点からこれを解釈している。

本論文は全編が7章から構成されている。以下、各章の概要をまとめる。

1 章 序 論

コンクリートの構造工学的観点及び破壊力学的観点から本研究の背景を述べ、目的を示している章である。また、本論文の構成、使用する語彙に関する所見を述べている。

2 章 コンクリートの破壊力学

本章では、第1節で、破壊エネルギー概念と引張軟化則について、その歴史的背景と現在知られている特徴と問題点を整理している。破壊エネルギー G_f と引張軟化則にまつわる問題は破壊進行領域 (Fracture Process Zone) の特性に起因すると考えられており、最も現在の課題は破壊進行領域の特性と引張軟化挙動の関係を明らかにすることである。第2節では、この破壊進行領域について幾つかの可視化を試みた実験的研究から破壊進行領域の特性に関して現在明らかになっている知見を整理する。第3節では、本論文の立場からの幾つかの見解を述べている。

3 章 ひび割れの離散化方程式と引張軟化モデルのパラメータ最適化手法

本章では、2つの数値計算法の定式化を行っている。一つは、破壊進行領域の力学的モデルである引張軟化則をモードI型の引張軟化挙動を呈する構造物の解析に取り入れ、巨視的な力学挙動である荷重-変形曲線を計算する方法である。ここでは、引張軟化則を撓性方程式に組み入れる方法を採用し、ひび割れの離散化方程式として定式化している。他の一つは、安定な破壊エネルギー試験の荷重-変形曲線を用いて、引張軟化モデルのパラメータを推定する最適化手法である。これは、引く続く4, 5, 6章において、2直線引張軟化モデルのパラメータ推定解析に用いられ、6章で区間最適化という新たな手法に発展させられる。

4 章 コンクリートの破壊進行領域

本章では、破壊進行領域の観察手法の一つであるAE発生源3次元位置標定手法を、骨材粒径の異なるコンクリートと高強度コンクリートのDCB試験に適用し、破壊進行領域の特性を調べた結果について述べている。AE手法は μm の精度を犠牲にしても破壊進行領域の全体の姿を表象するという本論文の目的にとっては優れた長所を持っている。骨材粒径の異なるコンクリートの全体挙動におけるAE発生源分布から、破壊進行領域は破断に至るまでに様な領域幅で成長せず拡大しながら成長する傾向を持つことを見出し、このことから、コンクリートの破壊エネルギー G_f に寸法依存性が生じ得ることを指摘している。一方、コンクリートのマトリックス強度が増大するところの拡大成長の傾向は失われ、コンクリートの内部構造の差異が破壊進行領域に影響を与えることも示した。さらに、シミュレーションによる引張軟化状態の推移を段階的にAE発生源分布及び表面の可視クラック進展と対応させることで、引張軟化曲線の初期急勾配部は主に微細ひび割れの発生や累積の挙動に、また、引張軟化曲線の後半の緩勾配部は骨材-マトリックス間の相互応力伝達機構 (ブリッジング) にそれぞれ対応するという引張軟化則と破壊進行領域との関係を提示している。

5章 コンクリートの引張軟化則

本章では、コンクリートの内部構造の変化を介して破壊進行領域の特性と引張軟化則の関係を求めている。基本的な考え方は、強度（第1節）、水セメント比（第2節）、最大骨材粒径（第3節）、材令（第4節）、繊維補強（第5節）、凍結（第6節）など試験条件や試験時環境条件の操作からコンクリートの内部構造を人工的に変えることにより、破壊進行過程の差異を顕在化させようとするものである。このようなコンクリートの破壊エネルギー試験結果に最適化手法を適用して2直線引張軟化モデルのパラメータを求め、内部構造の違いから予測される破壊進行領域の準微視的な特性の変化と、引張軟化モデルのパラメータと内部構造に影響を与える因子の間の関係から、破壊進行領域の特性と引張軟化則の関係を調べている。各節の結果は、4章で示した引張軟化曲線と破壊進行領域の特性との関係が、引張軟化モデルからみて妥当であることを示すものである。

6章 破壊進行領域の変動解析と寸法依存性

本章では、新たな最適化手法を用いて引張軟化特性のリガメント上で変動を推定することにより、破壊領域が一様に進展するのではなくその領域幅を広げながら進展するところを確かめるとともに、その変動が破壊エネルギー G_f の寸法依存性の原因であることを示している。まず、破壊エネルギー G_f の寸法依存性を調べた試験体について、2直線引張軟化モデルの最適パラメータを求め、寸法依存性が開口変位に関するパラメータの増大と関連していることを示した。次に、最大開口変位の直線変化を推定し引張軟化特性のリガメント上の推移の傾向を把握した。

新しい最適化手法の基本的な考え方は、破壊領域がリガメント上で一様に進展しないならリガメント上の各位置で引張軟化特性も変わるはずであるから、これを引張軟化モデルのパラメータの推移として求めるということである。そのような方法として、破壊エネルギー試験の荷重-変形曲線を部分的に最適化し段階的な引張軟化モデルのパラメータの推移を求めようとする漸減区間最適化手法及び移動区間最適化手法を考案した。この新しい最適化手法を寸法依存性を示したCT試験に適用し、引張軟化挙動の進行に伴う破壊エネルギー推移曲線と2直線引張軟化モデルのパラメータの推移を求めた。この破壊エネルギー推移曲線は、リガメント寸法の異なるもの同士が漸近して、全体として一つの推移曲線になっており、コンクリート固有の特性と考えられるものである。引張軟化モデルのパラメータの変動から、破壊進行領域の発生初期ではリガメント長さの違いの影響はなく破壊エネルギー G_f に寸法依存性は認められないが、破壊領域の進行に伴い開口変位のパラメータが増大し破壊エネルギー G_f が漸増することが示された。これは、破壊進行領域の領域幅がひび割れの進展に伴って拡大成長することによるものであり、実験から直接求めた破壊エネルギー G_f の寸法依存性は、このような破壊進行領域の進展特性を平均化する評価から生じるという解釈を示した。

7章 結 論

本章では、コンクリートの破壊進行領域の特性及び引張軟化挙動との関係に関して、各章を通して明らかになった所見ををまとめて述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

コンクリートの非線形破壊力学は、構造物の数値解析におけるコンクリート内部ひび割れの複雑な破壊過程を合理的に評価し、解析精度を高めるものとして近年注目されている。コンクリートの引張域におけるひび割れの挙動は破壊進行領域と呼ばれる過程であり、その力学的特性は引張軟化挙動で表わされるが、破壊進行領域の特性と引張軟化挙動の関係についてはまだよく知られていない。また、破壊進行領域の破壊力学的評価パラメータとして認められつつある破壊エネルギー G_f に寸法依存性が認められることも最近報告されるようになっており、その原因を明らかにすることが急務になっている。本論文は、破壊進行領域の特性と引張軟化挙動との関係、さらに破壊進行領域の機構が破壊エネルギー G_f の評価に与える影響を明らかにすることを目的としたもので、全編が7章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章は既往の研究をまとめた章である。コンクリートの破壊力学における破壊エネルギー概念と引張軟化則の問題点を整理し、現時点での課題が破壊進行領域の特性と引張軟化挙動の関係を明らかにする点にあることを示している。また、破壊進行領域についての可視化に関する実験的研究を整理するとともに、本研究の立場からの見解を述べている。

第3章では本研究で用いられる数値計算法の定式化を行っている。その一つは、引張軟化則を撓み性方程式に組み入れることによって、モードⅠ型の引張軟化挙動を呈する構造物の荷重-変形曲線を計算する方法である。もう一つは、安定な破壊エネルギー試験の荷重-変形曲線を用いて引張軟化モデルのパラメータを推定する最適化手法である。

第4章は、アコースティックエミッション(AE)発生源3次元位置評標定手法を用いて破壊進行領域の特性を論じている。骨材粒径を変えたコンクリートのAE発生源分布から、破壊進行領域が一様な領域幅で成長せず拡大しながら成長する傾向を持つことを見出し、この性質からコンクリートの破壊エネルギー G_f に寸法依存性が生じ得ることを示している。この拡大成長の傾向は、マトリックス強度が増大すると失われ、コンクリートの内部構造が破壊進行領域に影響を与えることも示している。さらに、シミュレーションによって引張軟化状態の推移を求め、これとリガメント方向のAE発生源分布及び表面の可視クラック進展状態とを対応させることにより、引張軟化曲線の初期急勾配部は主に微細ひび割れの発生や累積の挙動に、また、引張軟化曲線の後半の緩勾配部は骨材-マトリックス間の相互応力伝達機構(ブリッジング)にそれぞれ関係していることを明らかにしている。従来、不明瞭であった引張軟化則と破壊進行領域との関係を、実データを基に準微視的な視点から明示した点が極めて重要な知見である。

第5章では、内部構造を変化させたコンクリートを用いて、破壊進行領域の特性と引張軟化則の関係を論じている。この章のユニークな考え方は、強度、水セメント比、最大骨材粒径、材令、繊維補強、凍結などの試験条件や試験時環境条件の変化を、破壊進行過程の差異を顕在化させる内部構造の操作であるとみなしている点にある。このようなコンクリートの2直線引張軟化モデルのパラメータを推移し、その変化と内部構造の違いから予測される破壊進行領域の準微視的な特性の変

化から、破壊進行領域の特性と引張軟化則を関係付けている。その結果は、第4章で示している引張軟化曲線と破壊進行領域の特性との関係を裏付ける検証資料になっている。

第6章では、新しい最適化手法を用いた解析結果から、破壊進行領域の変動特性ならびに破壊エネルギー G_f の寸法依存性について論じている。この新しい手法は、リガメント上の各位置で引張軟化特性が変化することを許し、これを引張軟化モデルのパラメータの推移として求めるものであり、荷重-変形曲線を段階的に最適化する区間最適化手法として提案されている。破壊エネルギー G_f が寸法依存性を示したコンパクトテンション (CT) 試験にこの最適化手法を適用した結果、逆問題の解としての破壊エネルギー推移曲線を得ている。破壊エネルギー推移曲線には、破壊領域の進行とともにその値が増大する特性があること、また、リガメント寸法の異なるもの同士の破壊エネルギー推移曲線が漸近し全体としてコンクリートに固有な一つの曲線になるという性質があることを示している。さらに、引張軟化モデルにおける開口変位のパラメータの変動推定結果から、破壊進行領域幅が拡大しながら成長することにより破壊エネルギー G_f が漸増することを明らかにしている。これらのことから、実験により直接求めた破壊エネルギー G_f には、拡大成長する破壊進行領域でのエネルギー消費をリガメントにわたって一様として評価したことにより寸法依存性が生じる、という解釈を示している。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、コンクリートの破壊進行領域について、A Eに基づく実験的手法と種々の最適化手法を駆使して、その引張軟化挙動との関係を明らかにするとともに寸法依存性に合理的な解釈を下している点で、コンクリートの破壊力学上極めて価値の高い研究である。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。