

# 主論文の要約

論文題目 繊維を離散化したメゾスケール解析手法による繊維補強セメント系複合材料の破壊挙動評価に関する研究

氏名 小倉 大季

## 論文内容の要約

本研究は、数値解析による繊維補強セメント系複合材料（FRCC）の破壊挙動評価システムを構築すること、ならびにこのシステムの可能性と実用性を検討することを目的としたものである。まず、FRCC の破壊挙動を評価するためのメゾスケール解析手法を提案し、その性能評価を行った。その後、提案手法を用いることで、繊維の配向や分散状態が FRCC の破壊挙動に与える影響を検証できることや、力学性能がより優れた FRCC を開発するための材料設計用ツールとして利用できる可能性を示した。最後に、鉄筋補強した FRCC 部材の破壊挙動評価に対して提案手法を適用し、その破壊メカニズムを検討した。

本研究では、部材耐力などのマクロな挙動だけでなく、FRCC のひび割れ発生・進展のプロセスおよび破壊モードなどの定量的な表現にも力点をおいて検証を行った。数値解析を用いることにより FRCC 内部で起こる挙動に着目して現象を評価する点、ならびにあらゆる FRCC に対応できる手法の構築を目指す点が、本研究の特徴である。本論文は、全 7 章から構成される。

### 第 1 章

本章では、繊維補強セメント系複合材料を取り巻く近年の背景を示すとともに、本研究の目的と方向性について論じた。まず、様々な性能を有する新しい FRCC が開発されている近年の状況について述べ、その後、FRCC を実構造物に適用するにあたっての課題について論じた。その中でも、(1) マトリクス中の繊維の配向と分散、(2) FRCC の材料設計、(3) 鋼材と併用した場合の構造性能やひび割れ進展挙動、ならびに(4) 数値解析技術による

FRCC の力学性能評価、が重要な課題であることを述べ、それぞれに関連する既往の研究成果を整理した。そして、課題解決のためのアプローチとしては、従来の FEM 解析の延長線上や現在の指針や規準に載っている方法では必ずしも十分ではなく、より微視的なスケール（ひび割れや繊維のスケール）から FRCC を表現する解析手法が適していることを述べ、本研究の目指すべき方向性について論じた。

## 第 2 章

本章では、FRCC の破壊挙動を適切に評価できる手法の構築を目指して、短繊維を離散化したメゾスケール解析手法を提案し、その性能評価を行った。提案した解析手法は剛体ばねモデルをベースに開発した解析手法であり、その特徴は離散化した短繊維、マトリクスおよび両者の界面をそれぞれモデル化する点にある。

まず、これらのモデル化の詳細について述べた後、繊維-マトリクス界面のモデル化に必要なとされるパラメータを決定するために、繊維付着試験を実施して引抜き荷重-ひび割れ関係を取得した。そして、この結果から同定したパラメータを用いることで、実験で得られた繊維引抜き挙動を解析により妥当に表現できることを示した。

最後に、提案手法の検証を目的として、FRCC はりの曲げ載荷実験を対象とした再現解析を実行した。繊維とマトリクスおよび両者の界面に適切な材料パラメータを導入することで、繊維の架橋効果によって荷重が再上昇する挙動や、繊維種類と混入率の違いが曲げ破壊挙動に及ぼす影響を捉えられることを明らかにした。

## 第 3 章

前章では、繊維をマトリクス中にランダムに分布させてモデル化したが、実際の構造物では繊維の配向や分散状態に偏りが生じ、繊維が必ずしもランダムに分布しないことがある。そこで本章では、実験と解析による検討から、繊維の分布状態が FRCC の破壊挙動に与える影響を評価した。

まず、繊維補強モルタルで製作した平板からの切出し試験体を対象に、曲げ載荷と X 線 CT スキャンを行い、マトリクス中の繊維の配向や分散状態が力学性能に影響を及ぼすことを示した。次に、CT データから取得した現実の繊維分布構造（繊維 1 本 1 本の分布情報）を第 2 章で提案した解析手法に組み込み、破壊解析を実行することで、実験により近い曲げ破壊挙動を表現できることを示した。最後に、繊維を意図的に配向させたモデルを用いて曲げ解析を実行し、FRCC の破壊挙動に与える繊維配向の影響を評価できることを示した。

以上の検討を通して、FRCC の破壊挙動を精度良く捉えるためには繊維の配向や分散状態の影響を適切に考慮することが重要であること、ならびに提案手法を用いることにより繊維の配向性・分散性に依存した FRCC の力学性能を数値解析的に取り扱うことができ、その破壊挙動をシミュレートできることを示した。

## 第4章

本章では、第2章で提案した解析手法を用いてひずみ硬化型 FRCC の引張破壊解析を実行し、提案手法がより高性能な材料を開発するための材料設計用ツールとして利用できる可能性を検証した。まず、短繊維、マトリクスおよび両者の界面に適切なパラメータを入力することで、2種類のひずみ硬化型 FRCC の引張破壊挙動を比較的容易に再現できることを明らかにした。次に、それぞれの材料特性のばらつきなどに着目したパラメトリック解析を実行し、ひずみ硬化挙動および複数微細ひび割れの発生メカニズムについて考察した。

これらの検証を通して、提案手法は現状の FRCC の破壊メカニズムを検証できるだけでなく、繊維やマトリクスなどの構成材料の組合せと FRCC の破壊とを結びつけられる有力なツールになりうることを示した。すなわち高性能化を目的とした新たな構成材料の組合せ探索ができることを示した。

## 第5章

本章では、前章までに検証した解析手法を用いて、鉄筋を有する FRCC 部材の引張解析を実行し、その破壊挙動の解明を試みた。まず、部材を対象とした解析が実行できるように、提案した解析手法に離散鉄筋モデルを追加してモデルの拡張を行った。そして、この拡張した解析手法により、既往研究で報告されていた鉄筋降伏後にひび割れが局所化する現象を再現可能であることを示した。次に、繊維の混入率、鉄筋比、鉄筋-マトリクス間の付着特性ならびに繊維の分布状態を変動させた種々の数値実験を行い、各パラメータの組合せによっては鉄筋の降伏以降にひび割れが局所化する場合と局所化しない場合があることを示した。さらに、このメカニズムが繊維と鉄筋の架橋力-ひび割れ幅関係に着目することによって説明できることを明らかにした。最後に、ひび割れが局所化する現象を抑制するには、繊維混入率を小さくすること、鉄筋比を大きくすること、および鉄筋-FRCC間の付着特性を向上させることが有効であることを、解析による検討から示した。

以上の検討を通して、提案した手法が FRCC を鉄筋補強した場合でもそのひび割れ進展挙動を表現できるとともに、FRCC 部材の破壊メカニズムを考察するうえで有用なツールになりうることを示した。

## 第6章

本章では、本論文で提案した一連の解析手法を FRCC 部材の曲げ破壊挙動評価に適用した。まず、繊維、コンクリートマトリクスならびに両者の界面に関する特性値を適切に用いることで、鋼繊維補強コンクリート部材の曲げ破壊挙動をひび割れ進展や圧壊現象を含めて表現できることを示した。次に、繊維の混入率、鉄筋比などの各種パラメータを変動した解析を行い、最大荷重時の曲率が通常の RC 部材よりも小さくなる理由を、ひび割れの

局所化現象とコンクリートの圧壊との関係に着目して説明した。そして、ひび割れの局所化が早期に生じることを抑制して部材のじん性を向上させるには、鉄筋比を大きくすること、FRCC がたわみ硬化挙動を呈するまで繊維混入率を増加させること、および繊維分布のばらつきを小さくすることが有効な方策であることを、解析による検証から示した。

以上の検討を通して、提案した解析手法が FRCC 部材の破壊メカニズムを検証できるとともに、部材全体の挙動に与える局所的な繊維分布の影響についても検討できる手法であることを示した。

## 第 7 章

本章では、本論文の結論を示すとともに、今後の展望と課題について述べた。

今後の展望としては、提案した解析手法がせん断ずれ（モード II）の卓越する場合への展開も期待でき、FRCC 部材のせん断破壊のメカニズム解明に寄与する可能性があることを論じた。また、FRCC の破壊挙動を適切に評価するためには、FRCC を施工する際に生じる繊維の配向や分散状態をいかに正確に把握するかが重要であることを述べ、今後、部材中の繊維分布のばらつきを議論するための定量的なデータの蓄積などに取り組む必要があることを論じた。

以上、本研究では、繊維補強セメント系複合材料の破壊挙動を定量評価できる解析手法を成立させるための諸条件を明確にし、それを具体的なツールとして具現化するとともに、このツールの可能性と実用性をいくつかの解析事例を通して明らかにした。本論文で提示した考え方や手法は、FRCC 内部にて起こりうる挙動を把握するには有用であり、今後、様々な新しい FRCC の開発ならびにそれを適用した部材・構造の力学性能評価、終局挙動評価としての発展が期待できるものである。