

審査の結果の要旨

氏名 田中英紀

本論文では、炭素繊維シートで補強されたコンクリート構造要素の耐力・疲労寿命評価のための解析手法の確立を最終目的として、損傷力学に基づく解析コードの開発とその信頼度の実験的検証を実施している。

本論文の1章は、本研究の背景と概要について述べている。本論文の主要な内容は以下のとおりである。すなわち、①コンクリートの強度試験結果に基づき、弾塑性損傷構成方程式を同定したこと、②この構成方程式を有限要素プログラムに導入して、炭素繊維シート補強された実寸RC版の単調載荷および200万回予疲労後の単調曲げ破壊実験との比較検討により、解析手法の妥当性を検証したこと、③炭素繊維シート補強されたコンクリート構造要素の構造耐力に大きな影響を与え、かつその評価方法が十分確立されていない炭素繊維シート・コンクリート間の剥離破壊モードに対する単調載荷および疲労破壊モデルを開発し、実験結果と対比してその有効性を評価したこと、④現状の炭素繊維シート補強設計コードの調査を行い、設計プロセスへの損傷力学の導入および損傷力学による数値解析を用いた設計指針の改善例に基づき、炭素繊維シート補強設計への損傷力学の適用性を検討したことである。

本論文の2章では、コンクリートの弾塑性解析に適用されているDrucker-Pragerの相当応力を用いて弾塑性損傷構成方程式を定式化し、接線型の応力増分・ひずみ増分関係を誘導している。さらに、コンクリートの単軸圧縮および引張強度試験から得られた応力・ひずみ曲線に対するカーブフィッティングにより、構成方程式中のコンクリートの材料定数を決定した。同様に、曲げ疲労強度試験結果を利用して、損傷発展に関わる材料パラメータを決定した。

本論文の3章では、この弾塑性損傷構成方程式を二次元有限要素プログラムに組み込み、単調載荷曲げ強度および曲げ疲労強度試験結果と良好に対応する結果を得ている。特に、コンクリートのような脆性体では、局部ひび割れが構造崩壊とほぼ同時に起るため、部分連成解析により効率的に曲げ疲労破壊回数を把握できることを示した。また、完全連成解析による荷重・変位曲線、ひび割れ発生、進展などは実験結果と良好に対応した。

本論文の 4 章では、このプログラムを炭素繊維シート補強されたコンクリート構造要素の損傷破壊解析に適用している。炭素繊維シートによる補強効果を確認するため、無補強の RC 版と炭素繊維シート補強された RC 版の単調載荷曲げ耐力を比較し、さらに、200 万回予疲労を与えたシート補強版の単調載荷曲げ耐力を実験結果と対比した。その結果、無補強版のひび割れ発生荷重、補強版の脆性的破壊挙動、ひび割れ発生位置は実験結果と良好に対応した。200 万回予疲労を与えた補強版については、部分連成解析で予疲労時の損傷を評価し、これを初期損傷として単調載荷曲げ破壊解析を行った。予疲労が単調載荷曲げ耐力に与える低減率は、実験では 20%、解析では 12%であった。

本論文の 5 章は、炭素繊維シート・コンクリート間の剥離破壊モードの解析的検討である。すなわち、**Drucker-Prager** の相当応力と最大主応力を組合せた構成式に、せん断変形が卓越する場合に対応するため **Tresca** の相当応力を組み込んで二次元弾塑性損傷構成方程式を定式化し、二次元有限要素プログラムに導入した。予備解析（三次元線形弾性解析）により、剥離破壊は、付着面積による平均的な付着強度ではなく、コンクリート表層のせん断応力、特に付着区間端部に集中する最大せん断応力の影響を強く受け、付着面積の影響をほとんど受けないことが判明した。

さらに、この二次元モデルを周波数 5Hz の片振り載荷による疲労付着破壊解析に拡張した。この疲労付着破壊解析では、数十サイクルから数百サイクルまでの破壊回数に対応する最大荷重が約 4%程度の差しかないケースもあるが、異なるサイズの試験片 3 ケースにおいて、実験によく対応する結果を得ることができた。また損傷変数分布より、炭素繊維シート付着区間の端部に剥離が生じ、それが先端部に進展して全付着領域に広がり最終的な破壊状況を呈することがわかった。この現象は、コンクリート表層部のせん断応力が付着区間の根元部で最大となり、損傷変数が限界値に達して応力開放された結果であると推定でき、単調載荷付着破壊解析結果とも整合している。

本論文の 6 章は、損傷力学の補強設計コードへの適用性に関する検討である。現状の設計コードでは、有限要素法による安全性評価も導入されており、損傷力学の適用に関する準備は整っている。ここでは、従来の方法では評価が困難であった重要課題である剥離破壊モード評価に対する損傷力学ベースの数値解析の適用例を示した。すなわち、従来の評価方法を補足する形で損傷力学を適用することにより、安全性能照査の精度向上、新しい知見の反映による設計の合理化などが期待される。

以上を要するに、本論文では炭素繊維シートで補強されたコンクリート構造要素の耐力・疲労寿命評価を行う損傷力学ベースの解析手法を提案し、実験結果との比較により設計支援ツールとしての有用性を実証しており、高い工学的価値を有すると判断される。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。