

FRP 補強された柔軟構造物の最適設計に関する研究

学位論文内容の要旨

工業製品の軽量化や性能向上の要求に伴い、構造の高効率化を図ることが機械設計において重要となっている。しかし安易な軽量化は、各種の静的な荷重に対して構造の強度不足を招き、また動的な荷重に対しても共振などの振動問題を誘起し、変位や加速度が設計上の許容値を超え、疲労や破壊の原因を生み出す危険性がある。そこで機械構造物の安全性を確保しながら、一方でその軽量化や静特性および動特性の改善を合理的に行える設計はきわめて望ましいものと考えられる。構造物に所定の安全性や機能性を与え、一つまたは複数の目的量の最適化をはかるような設計に関する研究は最適設計と呼ばれ、古くから研究が進められてきた。最適設計の対象が拡大し、本格的な研究が進められたのは 1950 年代以後のコンピュータの発展に伴ってであり、さらに実設計への展開が可能となり始めたのは、近年のコンピュータとその周辺技術の急速な発達に負うところが大きい。

一方で繊維強化プラスチック (FRP) に代表される繊維強化複合材は、厚さや繊維配向角を適切に選択することで、設計要求に対して力学特性を改善できることが知られている。FRP の最大の特徴は、軽くて強いことである。航空機や宇宙機器の場合、軽いと言うことが決定的に重要であり、比強度や比剛性の値で材料の性能を評価することが多い。従来は、この異方性が現れないように繊維を積層して疑似等方性の FRP を作ることが多かった。しかし近年はこの性質を逆に利用して、その構造物に望ましい特性を与えるために繊維の配向角を最適化し、積極的にこの異方性を利用しようという動きが見られる。

最近では、複合材料が土木構造物や建築構造物の補強材として用いられている。1995 年 1 月 17 日早朝、明石海峡付近を震源とした兵庫県南部地震（マグニチュード $M = 7.2$ ）が発生し、多くの鉄筋コンクリート構造物が従来の地震被害とは比較にならないほどの大きな被害を受けた。わが国は環太平洋地震帯に属する世界有数の地震国であり、これからも大地震の発生が避けられず、既設構造物の耐震性向上が急務となっている。それを受け、近年ではシート状の連続炭素繊維シートを用いる補修・補強工法が、“軽量”、“高強度”、“高耐久性”と優れた性能を生かし、既設の橋脚躯体、高架橋柱、地下鉄中柱などの RC 構造物に巻き付けて補強するという方法が注目を集めている。連続炭素繊維シートとは、炭素繊維を一方向に並べてシート状にしたもので、これにエポキシ樹脂などを常温で含浸、硬化させて鉄筋コンクリートの補強に用いる。

連続炭素繊維による補強は、土木構造物や建築構造物への適用がほとんどであり、既存の金属構造物への適用は著者らの知る限りではあまりなされていない。機械構造物の多くは金属から構成されており、強度や振動問題を考慮して設計がなされる。しかしながら、使用条件や使用環境により設計段階では考慮しなかった外乱が生じ、共振などの振動を誘起することがある。そこで

本研究では、繊維強化プラスチックが持つ特徴を生かし、振動特性の最適化を目的として、コンクリート構造物の補強材としてではなく、既存の金属からなる構造物への補強を試みる。金属からなるはりや板構造物に、シートの繊維配向角、板厚、補強長さを適切に選択し、部分的に補強することにより振動特性の改善を行う。炭素繊維シートによる補強は現場での施工性に優れているため、既存金属構造物への適用が拡張されれば、振動問題を解決する一つの手段になり得る。

このような状況を踏まえ、本論文では施工性に優れた炭素繊維シートを、コンクリート構造物の補強材としてではなく、既存の金属からなるはりや板への補強材として用いる。部分的にFRP補強されたはりや板のモデリングを提案し、数値計算を行い、その振動特性を明らかにする。また、FRPシートにより補強された柔軟構造物の動特性を考慮した設計において、構造物の固有振動数を最大化し、理論通りに施工することは重要である。しかしながら、既存構造物を使用現場においてFRPシートを用いて補強する際、設計変数には製作誤差が生じ易く、理論どおりに施工することが困難であり、固有振動数も変動し得る。そこで、望む振動特性を実現するため、製作誤差に対して固有振動数の変動が鈍感となるロバスト性を考慮した設計手法を提案する。さらに、シートを用いて補強する際、減衰特性の改善を考慮して設計を行えば、振動特性の大幅な改善が期待できる。減衰特性と振動特性を同時に考慮した設計手法を示し、最後に実験を行い本研究の有効性を検証する。

本論文は5章で構成されている。以下にそれぞれの章の概要を具体的に示す。

第1章は序論であり、本研究の目的と意義および各章の概要について述べている。

第2章では、FRP補強されたはりのモデリングを示す。ここでは古典積層理論、多層積層理論に基づきリッツ法により自由振動解析を行う。この際、古典積層理論においては、断面が変化する位置での、変位とたわみ角の連続性を満足した変位関数と、さらに力学的連続条件まで満足した変位関数を用いる。強制振動実験を行い、固有振動数と振動モードを求め計算結果と比較することにより、モデリングの検証を行う。

第3章では、2章で提案したモデリングを用いて、振動特性の最適化を行う。FRPシートにより補強された構造物の動特性を考慮した設計において、構造物の固有振動数を最大化し、理論どおりに施工することは重要である。しかしながら、既存構造物を使用現場においてFRP補強する際、設計変数には製作誤差が生じ易く、固有振動数も変動しうる。そこで、製作誤差に対する固有振動数の変化を、設計者が指定した許容値に収め、構造物の固有振動数を最大化するロバスト設計手法を提案する。最後に、実験によりロバスト性を考慮した場合としない場合とで比較を行い、本研究の有効性を示す。

第4章は、スチール板にFRPシートを貼付した変厚ステップ板の自由振動に関する振動数方程式を、複素剛性係数を仮定しリッツ法によって導出する。その際、リッツ法の試験関数として、断面が変化する位置での変位とたわみ角の連続性を満足した変位関数を用いる。そして複素固有値問題を解くことにより、固有振動数、モード減衰比、固有ベクトルを求める。FRP補強された平板を3枚製作し、強制振動実験から固有振動数を、自由振動実験から減衰比を求め、FRPシートの剛性パラメータと減衰パラメータを遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて同定する。同定した値を用いて質量一定という条件のもと、補強位置、長さ、厚さ、繊維配向角を変え、振動と減衰特性を数値計算により検討する。減衰特性と振動特性を同時に考慮した評価関数を提案し、評価関数を最小化する設計変数を最適化手法を用いて決定する。最適化された構造物は基本振動数を最大化した構造物や、板全体にシートを貼付した構造物に比べ、減衰特性と剛性特性に優れている

ことを示す。既存のスチールからなる初期構造物にシートを設計どおりに貼り付け、実験を行いその有効性を検証する。

第5章は、各章の結果をまとめた結論であり、本研究で得られた成果を取りまとめている。

学位論文審査の要旨

主査	教授	山田	元
副査	教授	鍵和田	忠男
副査	教授	城	攻
副査	助教授	小林	幸徳

学位論文題名

FRP 補強された柔軟構造物の最適設計に関する研究

工業製品の軽量化や性能向上の要求に伴い、構造の高効率化を図ることは機械設計において重要となっている。しかし安易な軽量化は、各種の静的な荷重に対して構造の強度不足を招き、また動的な荷重に対しても共振などの振動問題を誘起し、疲労や破壊の原因を生み出す危険性がある。そこで機械構造物の安全性を確保しつつ、その軽量化や静特性および動特性の改善を合理的に行える設計はきわめて望ましいものと考えられる。一方、繊維強化プラスチック(FRP)に代表される繊維強化複合材は、厚さや繊維配向角を適切に選択することで、設計要求に対して力学特性を改善できることが知られている。

最近、複合材料が土木構造物や建築構造物の補強材として用いられている。すなわち、炭素繊維を一方向に並べてシート状にした、連続炭素繊維シートを用いる補修・補強工法が、軽量、高強度、高耐久性などの FRP の優れた性能を生かし、既設の橋脚躯体、高架橋柱、地下鉄中柱などの RC 構造物に巻き付け、エポキシ樹脂などを常温で含浸、硬化させて鉄筋コンクリートを補強するという方法が注目されている。

本論文では柔軟構造物の一例として金属からなるはりや板構造を考え、施工性の優れた炭素繊維シートを補強材として用い、部分的に FRP 補強されたはりや板の力学的モデリングを提案し、数値計算を行い、その振動特性を明らかにする。また、FRP シートにより補強された柔軟構造物の動特性を考慮した設計において、構造物の固有振動数を最大化し、理論通りの施工を実現するため、製作誤差に対して固有振動数の変動が鈍感となるロバスト性を考慮した設計手法を提案する。さらに、減衰特性と振動特性を同時に考慮した設計手法を提案するとともに、模型実験を行い本手法の信頼性を検証したものであり、その主要な成果は次の 3 点に要約される。

(1) FRP 補強されたはりのモデリング。ここでは古典積層理論、多層積層理論に基づきリッツ法により自由振動解析を行う。この際、古典積層理論においては、FRP の補強により断面が変化する位置での、変形の連続性を満足した変位関数と、さらに

力の連続条件まで満足した変位関数を用いる。強制振動実験を行い、固有振動数と振動モードを求め計算結果と比較することにより、モデリングの妥当性を検証した。

(2) 振動特性の最適化。 FRP シートにより補強された構造物の動特性を考慮した設計において、構造物の固有振動数を最大化し、理論どおりの性能を得るように施工することは重要である。そこで、製作誤差に対する固有振動数の変化を、設計者が指定した許容値に収め、構造物の固有振動数を最大化するロバスト設計手法を提案するとともに、実験によりロバスト性を考慮した場合としない場合とで比較を行い、その有効性を実証した。

(3) 減衰を考慮した平板の最適化。 スチール板に FRP シートを貼付した変厚ステップ板の自由振動に関する振動数方程式を、複素剛性係数を仮定しリッツ法によって導出する。そして、複素固有値問題を解くことにより、固有振動数、モード減衰比、固有ベクトルを求める。一方、FRP 補強された平板を製作し、強制振動実験から固有振動数を、自由振動実験から減衰比を求め、FRP シートの剛性パラメータと減衰パラメータを遺伝的アルゴリズムを用いて同定する。同定した値を用いて質量一定という条件のもとに、補強位置、長さ、厚さ、繊維配向角を変え、振動特性と減衰特性を数値計算により検討する。さらに、減衰特性と振動特性を同時に考慮した評価関数を提案し、評価関数を最小化する設計変数を最適化手法を用いて決定する。最適化された構造物は基本振動数を最大化した構造物や、板全体にシートを貼付した構造物に比べ、減衰特性と剛性に優れていることを示すとともに、既存のスチールからなる初期構造物にシートを設計どおりに貼付し、実験を行いその有効性を検証した。

これを要するに、著者は、FRP 補強された柔軟構造物のモデリングと最適化手法の提案を行い、柔軟構造物の最適補強設計に関して有益な知見を得たものであり、振動工学の進歩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。