

学位論文題名

橋梁構造物の知的構造化を目指した セミアクティブ振動制御の適用に関する研究

学位論文内容の要旨

橋梁構造物においては、地震動や交通荷重、風荷重などに起因する振動に対して安全性や使用性などの要求性能を確保することが極めて重要である。振動制御は、入力外力や制御対象の応答に応じて制御装置を動作させて構造物の動的応答量を抑制する手法であるが、制御対象の規模が大きいような場合、十分な制御力を得ることや装置の駆動エネルギーの確保が難しく、橋梁構造物にアクティブ制振手法を適用することはこれまで比較的困難であった。そこで構造物に制御力を直接作用させることなく、構造物の剛性や減衰などの構造性能を変化させることで制振を行う、セミアクティブ方式の振動制御が提案されている。また、最近では構造物の保有性能の維持や強化に寄与する一手法として、制御の要素技術であるセンサ、アクチュエータ、プロセッサの各機能が複合化した知的構造化が提唱されている。

本研究は、構造性能可変型セミアクティブ制御に関して、橋梁構造物の動的性能を向上させる手法としての有効性や適用性などを明らかにするとともに、知的構造化のためのセンサ機能の開発について基礎的な検討を行うことを目的とする。構造性能可変型制御については、簡便かつ設計が容易な制御システムを構築して制振シミュレーションや振動制御実験を行い、その制振効果や適用性、制御系の設計方法などについて検討する。また、センサ機能の低コスト化と高密度化を目指して非接触変位計測システムを構築し、その測定精度や適用性について述べる。

本論文は7章から構成されており、まず第1章では、構造物の振動制御に関する既往の研究と知的構造化に関してこれまでに提案されている概念をまとめ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、本研究で制御対象とした2種類の構造物について述べ、解析モデルの構築を行うとともに固有振動特性を把握することを目的とする。まず、解析と実験の両面から本研究の制御手法について検討するために塔状の実験供試体を製作した。この実験供試体は、鋼管とオイルダンパからなる制御装置の作動状態をON-OFFで変更することで、構造物全体の剛性と減衰を可変にする機構を有する。次に、一般的な構造形式を有する橋梁に対して本制御手法の制振効果などを検討するために、支間長40mの鋼桁橋に外ケーブルと可変剛性部材からなる可変剛性型システムを適用した解析モデルを構築した。鋼桁橋モデルは、活荷重の増大に対する長寿命化手法としての適用性を検討するために、活荷重関連規定がTL-20当時の標準設計に基づいてモデル化した。実験供試体の減衰自由振動実験や固有振動解析から、これらの制御対象構造物は制御装置が作動することで1次固有振動数が上昇することを確認し、モデル化は適切に行われたと判断される。

第3章では、構造性能可変型システムの制御則について述べ、具体的な制御系の設計を行うことを目的とする。構造性能可変型制御は、制御装置の動作に伴う固有振動特性の変化による非共

振化と、構造物全体の剛性・減衰の増大により動的応答量を抑制するものである。制御則については、制御対象の固有振動モードの卓越状況に応じて、制御装置の動作を選択的に変更する ON-OFF 制御を適用した。ここでは、制御装置が作動して制御対象に可変剛性・減衰が作用する状態を作動状態、制御装置を作動させない状態を通常状態と称する。ON-OFF の切り替えは、作動状態と通常状態におけるそれぞれの 1 次モードの応答加速度を観測量として、塔状構造物では上層、鋼板桁橋では支間中央点の応答加速度に対して、通常状態と作動状態の 1 次固有振動数を通過帯域に含むフィルタを適用した。これらのフィルタで抽出された応答加速度が予め設定した閾値を超過した場合に、通常状態と作動状態を切り替えて制御を行う。この ON-OFF 制御系の設計変数は、通常状態と作動状態に対する応答量の閾値と、制御装置の作動状態を一定時間継続する状態固定時間の 3 変数とした。これらの設計変数の設定は制振効果に大きな影響を与えるため、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いて組み合わせ最適化を行った。GA における解析では、各個体に対して釧路沖地震観測波や交通荷重を入力したシミュレーションを行い、評価関数に構造物のエネルギー量を用いて、構造物の運動、減衰、ひずみエネルギーの総和を制御時間全体で最小化するパラメータの組み合わせを探索した。上述のようなセミアクティブ制御の基本的な制振効果や制御系設計手法の妥当性を検討するために、塔状構造と吊床版を有する実験供試体を対象として可変減衰型方式による制振シミュレーションを実施し、いずれの制御対象においても十分な制振効果を確認した。したがって、本研究の ON-OFF 制御や制御系設計手法は妥当であることが明らかになった。

第 4 章では、可変剛性・減衰型制御が橋梁構造物の動的性能を向上させる手法として有効であることを明らかにするために、実験供試体を対象とした解析と実験を行った。最初に 1 次モードの減衰自由振動に対して制御を行い、ON-OFF 動作が適切に行われることと、卓越モードに対する制振効果を確認した。強制外力に対する検討は釧路沖地震観測波と兵庫県南部地震観測波の 2 種類の入力加速度について行った。解析と実験の双方でいずれの入力外力に対しても、ON-OFF の切り替えによる非共振化と剛性・減衰の付加によって 1 次モードの振動応答は著しく減少し、制御系設計時に観測量としていない 2 次モードについても、全体剛性と減衰の増大によって制振効果が確認された。このため、本研究の構造性能可変型システムは、不規則外力に対して安定した制振性能を有しており、橋梁構造物の動的性能を向上させるための有効な手法になり得ることが判明した。

第 5 章では、鋼板桁橋モデルの可変剛性型制御について、地震加速度と交通荷重を入力して制振シミュレーションを行い、ON-OFF 制御と瞬間最適制御の比較から制振効果や橋梁構造物への適用性などについて検討することを目的とする。地震加速度に対する解析では、ON-OFF 制御と瞬間最適制御のいずれにおいても非制御時と比較して動的応答量が減少し、ON-OFF 制御は簡便な手法ながら応答変位に対して極めて高い制振効果を発揮した。また、瞬間最適制御は剛性変化の範囲が比較的少なくても応答加速度、応答変位の両者を減少させることが明らかになった。交通振動については現行の B 活荷重を想定して解析を行い、いずれの制御則でも一定の制振効果が得られた。特に ON-OFF 制御では、構造物全体の剛性増加によって静的たわみの最大値が減少するとともに、変位やモーメントの動的振幅が減少したため、活荷重強度の増大に対応するための手法としての有効であることが確認された。また GA を用いた制御系設計についても、以上の結果から設計パラメータの決定を容易に行うことができ、その適用方法にも汎用性があると思われる。

第 6 章では、振動制御においては制御装置とともに状態量の観測が極めて重要であるため、廉価で汎用性を有するセンサ素子である CCD を用いた非接触変位計測装置を構築し、その計測精度や適用性について検討した。その結果、一般的な撮像装置と画像処理を組み合わせた計測システ

ムは、比較的高い空間分解能を有しており、橋梁の低次の振動モードであれば動的応答量の把握が可能であることが判明し、知的構造化においても十分な適用性を有すると考えられる。

第7章では、各章で得られた知見についてまとめ、本研究の総括を行った。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 佐 藤 浩 一
副 査 教 授 角 田 與 史 雄
副 査 教 授 三 上 隆
副 査 助 教 授 林 川 俊 郎

学 位 論 文 題 名

橋梁構造物の知的構造化を目指した セミアクティブ振動制御の適用に関する研究

橋梁構造物の安全性や使用性の確保においては、地震動や交通荷重、風荷重などに起因する振動に適切に対処することが重要である。振動制御は構造物の動的性能を確保する手法として知られているが、橋梁構造物へのアクティブ制御の適用は、十分な制御力を得ることや装置の駆動エネルギーの確保などが難しい場合がある。最近では構造物に制御力を直接作用させずに、剛性や減衰などの構造性能を変化させるセミアクティブ振動制御が提案されている。また、構造物の保有性能の維持や強化に寄与する一手法として、制御の要素技術であるセンサ、アクチュエータ、プロセッサの各機能が複合化した知的構造化も提唱されている。

本論文はこのような背景のもと、構造性能可変型セミアクティブ制御が橋梁構造物の動的性能を向上させることを明らかにするとともに、制御あるいは知的構造化に不可欠なセンサ機能の開発を行っている。構造性能可変型制御については、簡便かつ設計が容易な制御システムを提案して、シミュレーションや実験を通してその制振効果や適用性を明らかにしている。また、センサ機能については電荷結合素子(CCD)を用いて低コストで測定が可能な非接触変位計測システムを構築し、その測定精度や橋梁構造物の知的構造化への適用性を明らかにしている。

本論文は7章から構成されている。

第1章では、構造物の振動制御に関する既往の研究と知的構造化に関してこれまでに提案されている概念をまとめ、本研究の目的について述べている。

第2章では、本研究で制御対象とした塔状構造物と鋼鈹桁橋の2種類の構造物について述べ、解析モデルの構築を行うとともに固有振動特性を明らかにしている。塔状構造物は鋼製の実験供試体であり、鋼管とオイルダンパからなる可変剛性・減衰型制御装置のON-OFFを切り替えることで、固有振動数と減衰定数が変化する。鋼鈹桁橋は、活荷重規定がTL-20当時の標準設計に基づいて構築した解析モデルに、外ケーブルと可変剛性部材からなる可変剛性型システムを適用しており、剛性の付加によって1次固有振動数が上昇する。これらの制御対象構造物について、減衰自由振動実験や固有振動解析からモデル化が妥当であることを明らかにしている。

第3章では、構造性能可変型システムの制御則について述べ、具体的な制御系の設計を行っている。構造性能可変型制御は、制御装置の動作に伴う固有振動特性の変化による非共振化と、構

造物全体の剛性・減衰の増大により動的応答量を抑制するものである。制御則については、制御対象の固有振動モードの卓越状況に応じて、制御装置の動作を選択的に変更するのみの ON-OFF 制御を適用し、ON-OFF を変更する閾値などの設定は遺伝的アルゴリズム (GA) を用いている。さらに、これらの制御手法の基本的な有効性を確認するために、塔状構造や吊床版を有する解析モデルに対して減衰のみが変化する可変減衰型制御の解析を行い、高い制振効果を確認した。

第4章では、塔状構造物を対象として可変剛性・減衰型制御に関する解析と実験を行っている。強制外力として釧路沖地震と兵庫県南部地震の2種類の地震観測波を入力し、いずれの入力に対しても制御によって卓越振動モードの応答量が著しく減少することが判明した。したがって、可変剛性・減衰型制御システムは、不規則外力に対して安定して高い制振効果が発揮でき、橋梁構造物の動的性能を向上させることを明らかにしている。

第5章では、鋼鉄桁橋モデルの可変剛性型制御について、地震加速度と交通荷重に対して解析を行っている。解析では、ON-OFF 制御は簡便な手法ながらいずれの入力外力に対しても、構造物全体の剛性増加によって静的たわみの最大値が減少するとともに、変位やモーメントなどの動的振幅が低減された。この結果より、提案された制御手法は地震加速度のような不規則外力のみならず、交通荷重の増大に対して動的性能を確保できることを明らかにした。また GA を用いた制御系設計についても、設計パラメータの決定を容易に行うことができ、その適用方法にも汎用性があることを示している。

第6章では、知的構造化においては状態量の観測が極めて重要であるため、廉価で汎用性を有する CCD を用いた非接触変位計測システムを構築し、計測実験から橋梁の低次の振動モードでは動的応答量が正確に把握できることを示した。このことから、本計測システムは構造制御などを含む知的構造化において十分な適用性を有することを明らかにしている。

第7章では、各章で明らかとなった事項を要約し、本論文を総括している。

これを要するに、著者は、橋梁構造物の知的構造化のための構造制御方式として、セミアクティブ振動制御を適用することを目的に、ON-OFF 方式による構造性能可変型制御が、地震動や交通荷重などの不規則外力に対する動的応答量の抑制に有効であることを明らかにした。その上で知的構造化の要素技術の一つであるセンサ機能に関して非接触変位計測システムを開発し適用性を明らかにしたものであり、橋梁工学、構造工学、制御工学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。