

平成 21 年 3 月 13 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760354
 研究課題名(和文) マイクロ起振器と統計学的信号処理による構造物の簡易損傷検出手法の開発
 研究課題名(英文) Development of structural damage detection technique using micro shaking device and statistical signal processing
 研究代表者
 古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)
 九州大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号：00380585

研究成果の概要：構造物の損傷を簡単かつ高精度に検出することを目標に、可搬型で超小型の起振器（マイクロ起振器）を用いた損傷検出手法の開発を行った。精度を悪化させる原因は、解析モデルと計測データに含まれる誤差である。まず、統計学的信号処理手法によって、誤差を除去する手法を提案した。また、誤差の状況下で良い推定精度を得るための、最適計器配置の決定手法を提案した。さらに、少ないセンサで損傷を検出するための局所損傷検出手法を提案した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,100,000	0	2,100,000
2007年度	600,000	0	600,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	300,000	4,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：損傷検出・マイクロ起振器・統計学・信号処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 構造物の損傷検出手法の開発の必要性

人が安全にかつ安心して生活できる社会の構築のためには、構造物の耐震性能を高め、都市の防災能力を高めることは必要不可欠である。近年の我が国の経済状態を顧みると、建替えるよりも維持・管理に力を入れ、必要とあらば補修・補強を施すことにより、構造物の長寿化を図ることが非常に重要である。このような背景から、構造物の損傷検出手法について、これまでも多くの研究がなされている。

(2) マイクロ起振器を用いた損傷検出

申請者は、構造物の損傷を、簡単かつ経済的かつ高精度に検出することを目標に、マイクロ起振器を用いた新しい損傷検出手法の開発を行ってきた。これは、従来の重厚な起振器ではなく、可搬性に富む超小型の起振器（マイクロ起振器）を用いた振動実験によって、損傷部材の特定と損傷レベルの推定を行うものである。既に、制御モーターの脱着や起振器本体の工夫により、高性能化・可搬性・超小型化・経済性を実現したマイクロ起振器の開発に成功している。また、マイクロ起振器を用いて、構造物の損傷を検出するこ

とのできる数値解析手法の原型も開発済みであり、数値実験による理想的な条件下では、非常に高精度で損傷の検出が可能となることを検証済みであった。

(3) 解決されていない問題点

しかし、実用に供される手法となるためには、実構造物で手法の有効性を証明しなくてはならない。

実構造物に手法を適用するに当たって遭遇する諸問題のうち、最も重要なものが、実際の複雑な構造物を限られた自由度の物理モデルで近似する際のモデル化誤差と、振動データに含まれる計測ノイズである。これらの不確実性を考慮できる手法を開発しないことには、実用に供される手法とはなり得ない。

また、現状では、精度良い推定結果を得るには高密度観測が必要である。構造物の規模が大きくなるほど、必要なセンサの数が多くなり、計測コストが膨大となる。少ないセンサで損傷を検出する手法の開発が望まれる。

2. 研究の目的

(1) 統計学的信号処理手法の開発

本申請課題では、実構造物に手法を適用するにあたって遭遇する諸問題を解決するため、統計学と信号処理の分野で研究されている最先端のアルゴリズムを援用し、損傷検出問題に適用可能となるように理論の拡張を行い、それらを統合した統計学的信号処理手法を開発することを目的とした。

起振実験の際に計測される応答には、起振器による振動成分以外に、風荷重や交通振動などの外乱による振動成分も含まれる。(大型起振器を用いる場合は、過大な加振力によって大きく揺れるが、それでも交通車両による振動が局所的に多く混入される可能性がある。むしろ、過大な加振力が構造物に傷を与えてしまうこと、車両に対する安全性といった心配がある。マイクロ起振器を用いる場合はその心配は無用である。)

計測波形から外乱による振動成分を除去することができれば、交通規制を行わず、計測時間を選ばずして、マイクロ起振器を用いて精度よい損傷検出が可能となる。

そこで、信号処理の分野で雑音除去などに応用されている理論を導入して、起振器による振動成分だけを抽出することのできるデータ処理手法の開発を行った。

(2) 計器の最適配置に関する検討

(1)で開発した手法によって、モデル化誤差と計測ノイズを可能な限り除去することに成功しても、完全に除去することは不可能である。

モデル化誤差と計測ノイズが存在する状況下で、できるだけ良い推定結果を得るための新しい手法の開発が必要であると考えられる。

そこで、連立方程式の理論誤差に基づき、モデル化誤差と計測ノイズの影響下で精度よい損傷同定結果を得るための最適計器配置および最適起振振動数の決定方法を提案することも目的とした。

(3) 局所損傷検出手法に関する検討

従来の損傷検出手法では、精度良い推定結果を得るには高密度観測が必要であるため、大規模構造物の損傷を検出するには膨大な数のセンサが必要となり、現実的でない。

そこで、できるだけ少ないセンサで精度を下げず損傷を検出するための手法の検討も目的とした。

3. 研究の方法

(1) 統計学的信号処理手法の開発

平成 18 年度は、計測データに含まれる外乱の影響を除去する手法の開発を試みた。

信号処理における加法的な雑音の除去や、通信分野における混線信号の分離など、近年幅広い応用がなされている「独立成分分析」と呼ばれる手法を拡張して、起振器によって励起された応答だけを抽出する手法を開発した。

一般的な独立成分分析は、複数の源信号が「線形混合」された観測信号の分離手法である。一方、構造物の外力(源信号)と応答(観測信号)の関係は、「デコンボリューション」であるので、独立成分分析をダイレクトに適用することはできない。しかし、観測波形を「時間-周波数変換」すれば、各周波数に対しては外力と応答は線形混合の形となる。このことを利用すれば、独立成分分析の理論を適用できる。これにより、複数の外力を受けた構造物の応答から、起振力による応答を分離できることになる。

本研究では、上述の理論を援用し、解析プログラムを作成した。どの程度までの外乱なら分離可能であるのか、どのような振動数で構造物を起振すれば、より精度よく分離可能であるのかなど、手法の特性と適用限界について丁寧に検討した。提案手法により分離が可能になり、交通規制をせず、計測時間帯を選ぶことなく、実験が可能となる。

(2) 計器の最適配置に関する検討

平成 19 年度は、前年度に引き続き、実構造物に手法を適用する際に非常に大きな問題である、モデル化誤差や計測ノイズ等の不確実性の問題への対処方法について検討を行った。

マイクロ起振器を用いた損傷検出手法では、異なる計器配置と起振振動数の組み合わせ毎に、部材の剛性低下率と減衰増加率を求めるための方程式が成立する。計器配置・起振振動数の組み合わせを様々に変えて振動データを蓄積することで連立方程式を構築し、剛性低下率と減衰増加率を求めることができる。

連立方程式に基づく多くの損傷同定手法において、現状では、同定に用いる振動データの選定は任意である。どのように計器を配置し、どのような振動データを集めて連立方程式を構築すればよいのかについては、数値実験により同定精度を比較している程度であり、理論的に検討を行った研究は例が無い。

すなわち、信頼性の高い振動データの選定方法（連立方程式の構築方法）の確立が重要であり、またモデル化誤差・計測ノイズの影響を考慮することが必要であると考えられる。これに対し、本研究では、最適計器配置および最適起振振動数の決定手法を開発した。「最適」とは、「モデル化誤差・計測ノイズの影響下で精度良い結果が期待できる」という意味であり、連立方程式の解に含まれる理論誤差に基づき、理論誤差が小さくなる計器配置・起振振動数を「最適」と見なすこととした。

本研究では、上述の理論の定式化を行い、解析プログラムを作成した。片持ち梁を利用した数値シミュレーションを通して、理論誤差に与える計器配置・起振振動数の影響を調べた。検討結果を踏まえ、最適計器配置・最適起振振動数の決定方法を提案した。そして、3層フレーム構造物に対し、提案手法に基づいて選択された最適計器配置・最適起振振動数を用いて損傷同定を行い同定精度を確認することで、提案手法の有効性を検討した。

(3) 局所損傷検出手法に関する検討

高振動数で構造物を起振した場合、局所的な振動モードが励起されるため、局所エリア外の要素に対する連立方程式の係数行列が局所エリア内の要素に対する係数行列に比べて無視できるレベルに小さくなると考えた。このような場合、損傷を同定するには、局所エリアのみの連立方程式を解けばよいことになる。このようにして、損傷を同定すべき要素数（未知数）が減り、また必要な計測データ数も減らすことが可能となる。このような、局所エリア内の節点を起振・計測し、損傷を同定することを、本研究では局所損傷同定と呼ぶこととした。

本研究では、上述の理論の定式化を行い、局所損傷検出のための解析プログラムを作成した。

どの程度の高い振動数であれば局所損傷同定が可能となるのか、どの程度の局所エリ

アまで領域を絞ることができるのかは、構造物によって異なる。そこで、4 径間連続桁橋を対象とした数値解析によって、局所損傷同定の実現可能性について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 平成 18 年度

計測データに含まれる外乱の影響を除去する手法の開発に取り組んだ。また、開発した手法でノイズを除去することが可能であるのかを数値解析により検証し、さらに、ノイズを除去した振動データを用いて損傷を検出することが可能であるかを数値解析によって検証した。

手法の有用性を検証するため、2層ラーメン構造物を用いた数値解析により、マイクロ起振器を用いた振動実験を模擬した。起振器以外の外力として、床振動を想定した。このように、マイクロ起振器による調和外力と床振動を同時に受ける構造物の応答を数値解析により算出し、この算出された応答に対して独立成分分析を適用した。そして、提案したノイズ除去手法により起振器による応答を高精度で抽出できるかどうか、さらに、除去された起振応答を用いて構造物の損傷を同定できるかどうかを検証した。

その結果、非常に小さな起振力であっても、本手法を適用することによって真の起振応答にほぼ一致するフーリエ振幅が得られることがわかった。さらに、微動の存在下において非常に微小な起振力で構造物を加振するという不利な状況下であっても、独立成分分析を援用した前処理によって抽出された起振応答を用いることにより、良好な精度で剛性低下率および減衰増加率を同定できる可能性があることを示した。

(2) 平成 19 年度

平成 19 年度は、連立方程式の理論誤差に基づき、モデル化誤差と計測ノイズの影響下で精度よい損傷同定結果を得るための最適計器配置および最適起振振動数の決定方法を提案した。マイクロ起振器を用いた同定手法は、振動データ毎に得られる方程式を組み合わせた連立方程式を解くことで部材毎の損傷度を同定する。連立方程式の解に含まれる理論誤差に基づき、理論誤差が小さくなる計器配置・起振振動数を「最適」と見なすこととした。損傷同定の推定誤差の上界は、モデル化誤差、計測ノイズと連立方程式の係数行列の条件数によって与えられるため、モデル化誤差、計測ノイズの存在下で精度よい解を得る為に、条件数が小さい連立方程式となる計器配置・起振振動数を選択することとした。

片持ち梁を用いた数値解析を通して、計器配置と起振振動数が条件数や同定誤差に与

える影響を調べた。その結果、適切なデータの数を増やすことで条件数が小さくなることがわかった。条件数が非常に大きな値（ピーク値）を取り、大きな誤差を与える起振振動数があるが、データ数を増やすことで、このような起振振動数の数を減らすことができることがわかった。低い起振振動数と条件数がピーク値をとる起振振動数は、同定誤差が大きいので避けるべきであることがわかった。条件数が下に凸となる起振振動数に対する同定誤差は比較的小さいので、選択するとよいことがわかった。また、十分な数の計測点が得られない場合は、条件数が小さい起振振動数を複数用いてデータを蓄積すれば、起振点数を増やすよりも同定精度が高くなること、隣接した起振振動数を用いる場合は、起振点数を増やすよりも効果が低いことがわかった。数値シミュレーションによって、提案手法の有効性を示すことができた。

(3)平成 20 年度

振動特性に基づく損傷同定手法は、一般に、低次の構造物全体が振動するモードを利用するため、ある部材の局所的な損傷は、全体系の振動特性の変化に影響を及ぼす。ある地点の振動データが損傷によって変化した場合に、その変化を生じさせる損傷の可能性のある部材は構造物全体に及ぶため、損傷を同定するときは、構造物の全要素の剛性低下率が未知数となる。一意な解を得るには、未知数の数よりも多い観測点数が必要なので、高密度観測が必要となり、振動計測に膨大な労力と時間が必要になる。

以上のように、従来の振動特性を利用した構造物全体系の損傷同定手法は、構造物の規模が大きくなり複雑になるほど、実現が困難なものとなってしまう。そこで、構造物全体の同定を行うのではなく、着目したい部材だけの振動を計測して、着目したい部材だけの剛性低下率を同定する局所損傷同定の実現可能性について検討を行った。

マイクロ起振器によって、微動よりは高く、超音波よりは低い振動数で構造物を起振し、着目したいエリアの局所振動を励起させ、局所同定を行うことを考えた。提案手法は、十分に高い振動数で起振すれば、局所エリアで計測された応答に、エリア外の損傷が及ぼす影響が無視できる程度に小さくなることに基づいている。

4 径間連続桁橋モデルを対象とした数値シミュレーションによって、局所損傷同定が可能となる起振振動数について検討を行い、有用性を検証した。その結果、16kHz 以上の高

振動数で起振すれば、着目した橋脚の応答に、桁や他の橋脚の損傷が及ぼす影響が無視できる程度に小さくなることを確認し、少ない数のセンサで、少ない数の計測で、局所同定が可能となることを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

古川愛子, 清野純史, 大塚久哲, 独立成分分析を用いた起振応答の抽出法と損傷同定問題への適用, 応用力学論文集, Vol.9, pp.43-54, 2006.

古川愛子, 大塚久哲, 損傷同定の最適計器配置・最適起振振動数の決定手法について, 第 62 回土木学会年次学術講演会概要集, Vol.62, 論文番号 I-597, 2007.

古川愛子, 大塚久哲, 理論誤差を指標とした損傷同定のための最適計器配置・最適起振振動数の決定手法, 土木学会地震工学論文集, 第 29 巻, 論文 11-0013, 2007.

古川愛子, 大塚久哲, 高振動数領域のフーリエ振幅を用いた局所損傷同定, 応用力学論文集, Vol.11, pp.27-37, 2008.

[学会発表](計4件)

古川愛子, 独立成分分析を用いた起振応答の抽出法と損傷同定問題への適用, 応用力学シンポジウム, 2006年9月19日, 京都大学.

古川愛子, 損傷同定の最適計器配置・最適起振振動数の決定手法について, 第 62 回土木学会年次学術講演会, 2007年9月13日, 広島大学.

古川愛子, 理論誤差を指標とした損傷同定のための最適計器配置・最適起振振動数の決定手法, 土木学会地震工学研究発表会, 2007年8月29日, 九州大学.

古川愛子, 高振動数領域のフーリエ振幅を用いた局所損傷同定, 応用力学シンポジウム, 2008年9月9日, 東北大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

古川 愛子 (FURUKAWA AIKO)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号: 00380585