

氏名	たなか たかし <b>田中 昂</b>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博甲第741号
学位授与の日付	平成27年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	<b>非線形波動変調に基づく構造物損傷の位置推定に関する研究</b>
審査委員	(主査)教授 増田 新 教授 曾根 彰 教授 村田 滋 准教授 澤田祐一 准教授 射場大輔

### 論文内容の要旨

本研究は、非線形波動変調現象に基づく構造物損傷の検知と位置推定に関する研究である。非線形波動変調とは、損傷部において存在する粗面同士の接触界面に入射される高周波波動の散乱特性が、接触界面の非線形性のために低周波振動に同期した変化を示すことにより、受信される高周波波動の振幅や位相に変調が生じる現象である。申請者は本論文において、この現象に基づく二つの新たな損傷位置検出手法を提案し、はり構造物を対象とした実験によってこれらの手法の有効性を示した。

第一の提案は、単一の高周波正弦波波動が入射される構造物に対してインパクトハンマ加振を行った際に、損傷部における接触界面の非線形性によって励起される高周波波動の擾乱が損傷の両側の2点に到達するまでの時間差に着目した損傷位置検出手法である。初めに、打音検査の概要と問題点を示し、非線形波動変調現象に基づく損傷検知手法の必要性を述べた。振動計測から構造物を伝播する波動成分を推定するためのティモシェンコはり理論にのっとり波動分離法について説明した後、インパクトハンマ加振によって変調した高周波波動の復調波の伝播理論を構築し、構築した理論に基づき損傷の両側に位置するセンサアレイに到達するまでの到達時間の差と群速度で表される損傷位置推定式を用いた損傷位置推定手法を提案した。また、模擬損傷を設けたはり試験片を用いた実験により精度よく損傷位置推定が可能であることを示した。

第二の提案は、広帯域の高周波ランダム波動が入射される構造物において、損傷部における接触界面の非線形性に起因する高周波波動の反射特性の変化を、短時間フーリエ変換と波動の分散関係を用いて定義される反射強度の空間—時間マップによって捉えることにより、損傷の位置検出および接触タイプ損傷であるか否かを判別することができる手法である。初めに、過去の非線形波動変調現象に基づく損傷検知手法の検査手順を示し、事前に調査が必要であった高周波波動の周波数選択作業の簡略化を目的として広帯域高周波波動を用いた損傷位置推定手法を示した。すなわち、複数の共振周波数を内包する広帯域高周波波動を用いることで高周波波動の周波数帯域の時変波動伝達関数を短時間フーリエ変換により推定し、分散関係に基づき周波数領域から波数領域の記述に変換して短時間逆フーリエ変換することで反射強度の空間—時間マップが得られる。得られた反射強度の空間—時間マップのピークから損傷の位置が求められ、損傷位置におけ

る反射強度の時間変動の周波数解析をすることで損傷が接触タイプであるか否かを判別することができる。時変波動伝達関数推定時に必要な低周波振動に同期した平均化手法について述べたのち、単一の模擬損傷を設けたはり試験片を用いた損傷位置推定実験の結果、固定端境界位置における反射強度の時間変動は低周波成分に同期せず、接触タイプ損傷の位置における反射強度の時間変動のみが低周波振動に同期して変動することを示した。次に、複数の模擬損傷を設けたはり試験片を用いた損傷位置推定実験を行った結果、センサアレイに最も近い接触タイプ損傷の位置を推定することはできたが、ほかの損傷の検出は困難であることが分かった。これは、本手法で推定した反射強度の空間—時間マップが一度の反射のみを考慮したものであることが原因と推察された。

続いて、第二の手法を、インフラ構造物において最もよく用いられている部材接合法のひとつであるボルト継ぎ手の診断に適用することを提案した。初めにボルト締結の緩みのメカニズムについて説明したのち、ボルト緩み防止手法について述べ、ボルト締結部のモニタリング手法に関する既往研究について概要を示した。次に、本研究で提案した第二の手法を適用することの優位性を示した後、反射強度ピークの時間変動振幅とピークの平均値からなる損傷評価指標を定義した。複数のボルトにより構成されるボルト継ぎ手を一つ設けたはり試験片を用いて締付トルク管理による健全性評価実験を行い、センサアレイに最も近い位置のボルトが過剰締付トルクと過少締付トルクの場合に、ボルト締結部位置における損傷指標が上昇することを示した。また、センサアレイから遠い位置のボルトの締付トルク変化には鈍感であることを示した。これはボルト継ぎ手を構成する複数のボルトの位置すべてが高周波波動の反射点になるため、上述と同様の理由で背後の損傷部における反射位置の検出が困難となるためと推察された。

最後に、本研究においてなされた提案と得られた知見についてまとめ、研究を総括した。

## 論文審査の結果の要旨

本学位申請論文は、粗面同士の接触界面における低周波振動と高周波波動の相互作用、すなわち非線形波動変調と呼ばれる現象を用いた二種類の構造物損傷検出手法を新規に提案するものであり、学術的にも、非線形波動変調法に基づく損傷位置の推定という、これまで十分に研究が進んでいなかった領域の発展に貢献するものである。

第一の手法では、低周波振動としてインパクトハンマによる衝撃応答を、高周波波動として単一周波数の正弦波を用いている。インパクト加振によって励起された低次モード振動によって損傷部で散乱される高周波波動に変調が導入され、それが2箇所のセンサに到達する時間差を用いて損傷位置を推定する。本手法は、原理上、板やシェルなどの2次元構造物にも容易に展開可能であると期待され、現在、構造物の点検に広く用いられている打音検査の高度化に繋がりうる有用な手法である。

第二の手法では、低周波振動として単一周波数の正弦波を、高周波波動としてランダム波を用いている。通常非線形波動変調法と異なり連続的な周波数分布を持つランダム波を使用することにより、損傷位置の検出を可能とする独創的な手法である。複数の損傷がある場合にセンサから見て最前面の損傷しか検出できないという欠点があるが、解決方法のアイデアが提示されている。

以上のように、本論文で提案した二つの手法は、非線形波動変調現象を用いた損傷検出および

健全性評価の研究として、十分な新規性と独創性を有すると認められる。また、これらの手法は、インフラ構造物の維持管理において問題となる疲労き裂、接着はく離、ボルト緩みなどの接触タイプ損傷の検出および評価に適用可能であると期待され、十分な工学的有用性を有するものと判断される。

本論文の内容は以下の3報の学術論文誌および国際会議の査読論文として公表済みであり、いずれも申請者を筆頭著者とするものである。

1. 田中昂, 増田新, 曾根彰, インパクトハンマ加振を受けるはりにおける非線形波動変調現象に基づく損傷位置の推定, 日本機械学会論文集C編 Vol.79, No. 801, pp.1594-1601, 2013.
2. Takashi Tanaka, Arata Masuda, Akira Sone, Localization of Contact-Type Failure in Beam Structure Based on Reflectivity Modulation, Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration, 2B22, pp.1-9, 2014.
3. Takashi Tanaka, Arata Masuda, Akira Sone, Integrity Diagnosis Method of Bolted Joint Based on Time Fluctuation of Reflection Intensity Caused by Nonlinear Wave Modulation, Proceedings of the ASME 2014 International Design & Engineering Technical Conference and Computers & Information in Engineering Conference, DETC2014-34879, pp.1-7, 2014.