

論文の内容の要旨

論文題目 構造物の地震応答加速度記録の高次微分解析による
損傷評価手法に関する研究

氏名 涌井 将貴

現在、我が国では地震被害を受けた建築物等に対する被害状況の判定として、「応急危険度判定」および「被災度区分判定」が行われる。これらの判定は判定士が目視で一棟ずつ行っているのが現状であり、判定に時間を要すること、判定が定性的であること、内装材等により構造躯体を直視することができなことから、などが問題点として挙げられる。今後発生が懸念される首都直下地震や南海トラフ地震では、多くの避難民が発生し、避難所が不足する可能性が危惧されている。このような問題を解決するために、建築物の損傷を定量的に評価する技術体系を確立する必要がある。

このような背景から、建物にあらかじめセンサ等を設置しておき、センサによって計測されたデータから建物の健全状態を判断することを目的とした構造ヘルスマモニタリングや損傷度評価に関する研究が数多く行われている。これらの研究の多くは、計測対象であるシステム（建物）をブラックボックスとし、地震動を入力、計測記録を出力として、システム異常を検出・評価するシステム同定として行われている(図1)。

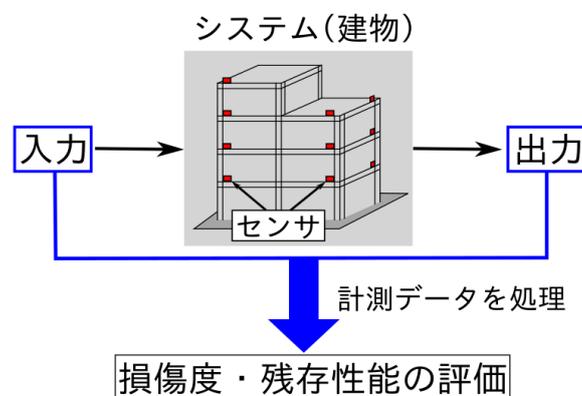


図1 ヘルスモニタリングの概念

しかし、現在提案されている方法の多くは、構造物の剛性変化を固有周期やモードの変化から検出し、評価するというものであるが、これだけでは構造物の損傷を直接的に評価することは困難である。そこで本研究では、構造物の地震応答加速度と荷重-変形関係との対応関係を数式的に処理し、構造物の損傷をより直接的かつ定量的に検出する手法を提案することを目的としている。提案する損傷評価手法の特徴は、

1. 構造物で計測された地震応答加速度を時間に対して微分した物理量に着目し、
2. 質点系の運動方程式を用いて、加速度を微分した物理量と荷重-変形関係との対応関係を定式化し、
3. 剛性変化に起因する非線形性を検出するための閾値、および計測記録に含まれるノイズへの対処方法を、振動系の物理パラメータから定量的に設定し、
4. 設定した閾値によって、荷重-変形関係に生じる非線形性を検出し、
5. 非線形挙動時の剛性低下率、あるいは塑性変形量を推定する

点である。定量的な被災度区分判定手法の提案、および実構造物への適用を目指し、本研究ではその基礎的な検討として、絶対加速度の微分量を用いることで構造物の損傷を定量的に検出・評価する手法を提案し、その適用性を解析的・実験的に検討する。本論文の構成を以下に示す。

第1章“序”では、本研究の背景と目的について述べている。

振動計測記録を用いて、構造物の損傷を定量的に評価する手法の必要性を論じるとともに、振動計測および計測記録による損傷評価手法に関連する既往研究について整理し、その概要等をまとめている。併せて、本研究の目的、特徴について述べている。

第2章“絶対加速度の高次微分の定式化”では、せん断質点系の運動方程式から算出される絶対加速度を高次微分した物理量の定式化を行い、振動系応答との対応関係を示している。

本研究では、振動系の絶対加速度を高次微分した物理量に着目し、その物理量を用いて損傷を定量的に検出・評価する方法を提案することを目的としている。そこで第2章では、絶対加速度を微分した物理量について定義した。せん断質点系の運動方程式から算出される絶対加速度を微分した物理量を定式化し、振動系の履歴復元力と、微分した物理量との対応関係を明らかにした。本研究では、絶対加速度の時間に対する1階微分を *jerk*、2階微分を *snap* と呼称することになっている。*jerk* および *snap* の定式化においては、加速度が時間に対して連続であるものとして行っているが、振動計測によって得られる加速度応答記録はデジタルデータとして収録される。加速度応答記録を微分することで、*jerk* あるいは *snap* 時刻歴波形を算出する際には、差分方程式を用いることになる。そこで、加速度応答記録が時間に対して離散的である場合における、*jerk* および *snap* についても整理している。

第3章 “絶対加速度の微分を用いた損傷評価”では、第2章で定式化した絶対加速度を微分した物理量である jerk および snap を用いた損傷評価手法を提案している。

本研究において、「損傷」を荷重-変形関係に生じる剛性変化に起因する非線形性と定義した。提案した損傷評価手法は、絶対加速度を微分した物理量である jerk および snap が、振動系の履歴復元力の剛性と直接的に関係した値であることを利用するものである。そこで、第3章では、第2章で定式化した jerk および snap を用いて、振動系の損傷を検出・評価する方法を提案した。提案した損傷評価手法は、荷重-変形関係における剛性の変化に起因する非線形性を検出し、非線形挙動時の剛性低下率、あるいは塑性変形量を推定するものである。まずは、無減衰1質点系についての損傷評価理論を構築し、その後、多質点せん断系の理論へ拡張した。提案した損傷評価手法の適用性を数値解析によって検討した結果、降伏点における剛性急変を検出し、降伏後の塑性変形量を推定することが可能であることを示せた。

第4章 “ノイズの影響とその対処方法”では、振動計測によって得られる加速度応答記録に含まれるノイズが、snap に与える影響を検討し、その対処方法について提案している。

一般的に、加速度センサによる振動計測では、計測された加速度応答記録にノイズが含まれることになる。本研究で提案している損傷評価手法では、加速度応答記録を微分した物理量である jerk および snap を利用して理論構築を行っている。微分処理は高周波ノイズの影響を強く受けるため、ノイズが含まれる加速度応答記録をそのまま微分処理してしまうと有益な情報を抽出することが困難となる。

そこで第4章では、絶対加速度を微分して snap を算出する際に、ノイズが与える影響を検討するとともに、ダウンサンプリングによってノイズの影響を低減する方法を提案した。提案したノイズ低減処理方法の妥当性を、数値応答解析結果を用いて検討した。その結果、ノイズを含む加速度記録をそのまま微分した場合には、ノイズの影響によって、設定した閾値による剛性変化に起因する非線形性の検出が困難であるが、ノイズ低減処理を行うことで、設定した閾値によって非線形性検出が可能となることを示した。高周波ノイズへの耐性が低い、微分操作を用いた手法ではあるが、提案したノイズ低減処理方法によって概ね非線形性検出が可能であり、その有用性を示せた。

第5章 “構造部材ごとの振動台実験結果への適用性”では、第3章で提案した損傷評価手法の適用性を、既往研究で行われた構造部材の振動台実験結果を用いて検討している

検討した構造部材は、露出型柱脚2体、柱梁接合部2体、鉛直ブレース1体の計5体である。これらの振動台実験では、試験体の損傷箇所が1箇所、1質点1自由度系として考えることができるため、振動系の非線形挙動と提案手法との対応関係が観察しやすい。

加振実験において得られた加速度応答記録から、第4章で提案したノイズ低減処理方法を用いて jerk および snap 時刻歴波形を算出している。算出した snap の値と、設定した閾値を比較することで、荷重-変形関係における非線形性検出が可能であることを示した。特に、露出型柱脚では、明確に降伏点を検出可能であることから、第3章で提案した塑性変形量の推定方法を用いて、塑性化ごとの塑性率を算出し、推定精度を検証した。降伏点直前の剛性が初期弾性剛性と同等度である復元力特性を有する場合には、十分な精度で塑性率を推定することが可能であることがわかった。また、柱梁接合部試験体では、初期弾性剛性に対する接線剛性の低下率を5~15%程度の誤差で評価することが可能であることを示した。鉛直ブレース試験体では、snap と絶対加速度の関係から、試験体の線形性を判定することが可能であり、ブレース材の破断前後の剛性変化を評価できる可能性を示した。しかし、snap によって検出される非線形性が、どの現象（降伏、亀裂や破断、座屈など）によるものなのかを判別することは困難であることがわかった。

第6章“多層骨組構造物の振動台実験結果への適用性”では、第3章で提案した多質点せん断系の損傷評価手法を、多層骨組系へ拡張することを試みている。

第3章で提案した損傷評価手法は、せん断質点系の運動方程式から理論構築を行っている。実際の建築物の多くは骨組系であることから、提案した損傷評価手法を骨組系へ拡張し、その適用性を検討する必要がある。骨組系であっても、梁が十分な剛性を有している場合には、せん断質点系として置換することで、提案した多質点せん断系における層レベルの非線形性検出方法を適用することが可能と考えられる。

そこで、18層鉄骨骨組構造物の振動台実験結果を用いて、非線形性検出方法の適用性を検討した。試験体の梁と床スラブは一体化しており、スラブや梁にある程度の損傷が生じるまでは、せん断系として考えられるものとした。各層で計測される床応答加速度記録を用いて、snap 時刻歴波形および層せん断力-層間変位関係をそれぞれ算出した。各層の層せん断力-層間変位関係に非線形性が生じる時点を、snap 時刻歴波形と設定した閾値によって検出することが可能であることを示した。損傷の進行に伴い、非線形性検出回数も増加することから、損傷状況と非線形性検出回数には定性的な関係があることを示した。

しかし、多層骨組系では、1つの層のみが損傷した場合でも、他の層の層せん断力-層間変位関係に非線形性を生じさせること、せん断変形だけでなく、建物全体の曲げ変形によっても非線形性を示すこと、などの要因から、提案手法では損傷層の同定や、損傷度の評価を行うことは困難であり、今後の検討が必要であることがわかった。

第7章“結論”では、各章で得られた知見を要約し、本研究の結論と今後の課題を述べている。