

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：33108

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H07236

研究課題名(和文) 加速度応答の高次微分量に基づく局所損傷同定手法に関する研究

研究課題名(英文) Study of detection method to based on high-order time derivative of acceleration response.

研究代表者

涌井 将貴 (Wakui, Masaki)

新潟工科大学・工学部・助教

研究者番号：40778205

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：鋼構造建築物が地震によって被害を受けた場合に、構造部材に降伏や破断、き裂や座屈といった損傷が生じると、構造物の荷重-変形関係には剛性の変化に起因する非線形性が生じる。そこで本研究は、地震時に計測された加速度応答記録を高次微分した物理量に着目し、この物理量と構造物の非線形挙動との理論的關係から、構造物の損傷度推定手法を提案し、その手法の適用性を解析的・実験的に検討した。計測記録にノイズが含まれるような場合であっても、提案した手法によって損傷検出が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：When the steel structure experiences a strong earthquake, damage such as yielding, fracture, buckling in structure members may occurs. These phenomena appear as nonlinearity caused by changing the stiffness in the load-displacement relationship. This study presents a method which is capable of detecting changes in the stiffness of structure using high-order time derivative of acceleration response. The proposed method was validated to the estimation accuracy from earthquake response analysis and shaking table tests. The results show that it is possible to detect and estimate damage for both the analysis result and shaking table tests.

研究分野：建築構造

キーワード：加速度の高次微分 損傷評価 構造ヘルスマニタリング

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震などの広範囲にわたって被害が生じるような場合には、応急危険度判定や被災区分判定を迅速に行うことが困難となる。今後発生が懸念される南海トラフ地震などでは、広範囲にわたる建物被害が予想され、避難所の不足や帰宅困難者の発生といった問題が生じることが想定されている。このような背景から、地震等による災害が発生した際に、構造物の健全性評価を即時に判定し、建物の継続使用性や避難の必要性を判断する技術が必要とされている。

この問題の解決策として、構造ヘルスマニタリング技術の研究が国内外で活発に行われている。建物にあらかじめ計測用センサを設置しておき、計測記録を用いたシステム同定や損傷評価に関して、数多くの研究があり、特に高層建物において健全性判定システムの導入が進められてはいるものの、実用化に至っているシステムの多くは、設計時に想定される限界値と地震時の最大応答値を比較して評価するものとなっている。このようなシステムでは、構造部材や骨組に生じた損傷を検出することができないため、損傷に起因した剛性や耐力の低下といった残余耐震性能を定量的に評価することが困難な現状にある。この現状を打開するために、より構造物の損傷と直接的に関連のある指標を用いた損傷評価手法を確立し、残存耐震性能を評価する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、比較的計測が容易である加速度応答記録と構造損傷を理論的に関連付けることで、構造物の損傷検出手法を提案するものである。加速度の高次微分と荷重変形関係の剛性変化に起因する非線形性を数式化することで、損傷判定に用いる閾値を定量的に決定する。さらに、検出結果を利用することで、損傷程度を推定する方法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、加速度応答記録の1階微分(jerk)、2階微分(snap)を対象として、振動系との対応関係を数式化することで、対象の損傷を検出する手法を提案する。研究方法は大きく「理論構築」「数値応答解析による検証」「振動台実験の計測データによる検証」の3つに分けられる。

「理論構築」部では、加速度応答の微分であるjerkやsnapに基づく損傷評価理論を提案する。これまでに定式化してきたjerkおよびsnapを用いて、振動系の剛性変化、損傷検出に用いる閾値および計測記録に含まれるノイズの影響も定式化する。提案した理論を「数値応答解析による検証」および「振動台実験の計測データによる検証」での適用性を検討し、その結果をフィードバックすることで、より実用性の高い理論構築を目指す。

「数値応答解析による検証」部では、せん断質点系モデル、および骨組系モデルを用いた数値応答解析を行い、解析結果から得られた加速度応答記録に対して本評価理論の適用性を検討する。この際、実際に加速度センサを用いた振動計測では、計測した加速度記録に不可避のノイズが含まれる。ノイズの影響を考慮するため、解析によって得られた加速度記録にホワイトノイズを付加することで、ノイズを含む加速度記録を模擬して検討する。

「振動台実験の計測データによる検証」部では、実際の構造部材および骨組構造物を対象とした振動台実験の計測結果を取得・整理する。実験によって得られた加速度応答記録を用いて、提案する損傷評価理論の適用性を検討する。

4. 研究成果

(1)非線形性検出

本研究課題においては、数値応答解析結果(1質点系、多質点系、多層骨組系)および振動台実験結果(柱脚、柱梁接合部、鉛直ブレース、骨組構造物)から得られる加速度応答記録を用いて提案手法による非線形性の検出精

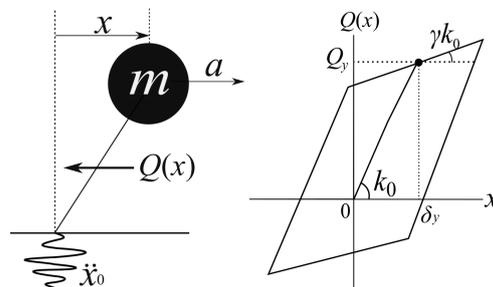


図1 振動系モデルと復元力特性

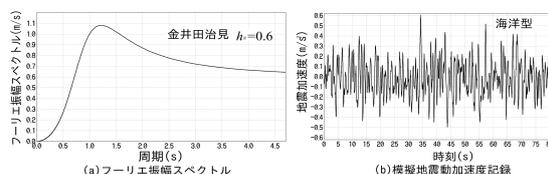


図2 模擬地震動

度を検証した。本報告では、例として図1に示したバイリニア型の荷重変形関係を有する非減衰1質点系モデルを用いて検討結果を示す。振動系の弾性固有周期は1秒、二次剛性比 γ は $\gamma=0, 0.2$ の2種類とする。入力地震動としては、図2に示す模擬地震動を用いた。応答解析によって得られた加速度記録には、加速度応答の最大値の2%を最大値とするホワイトノイズを加えることで、ノイズを含む加速度記録を作成した。

作成した加速度記録を用い、提案手法を適用して非線形性検出を行った結果を図3に示す。図は横軸を時刻、縦軸をsnapとしたsnap時刻歴波形であり、併せて、閾値をグレーの線

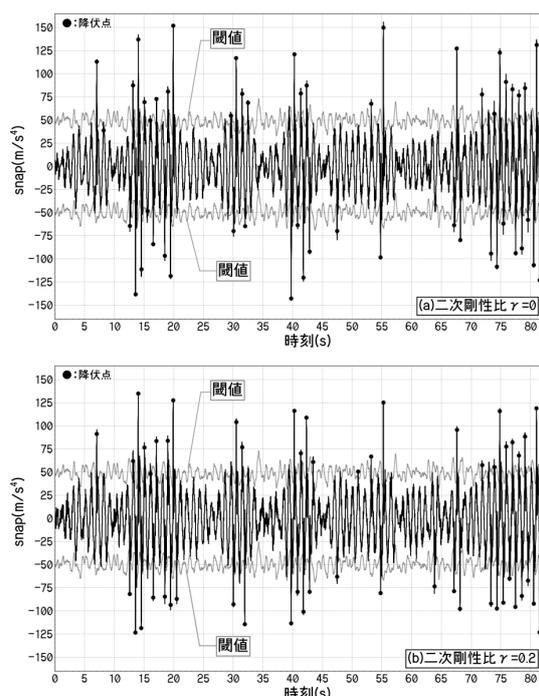


図3 snap時刻歴波形

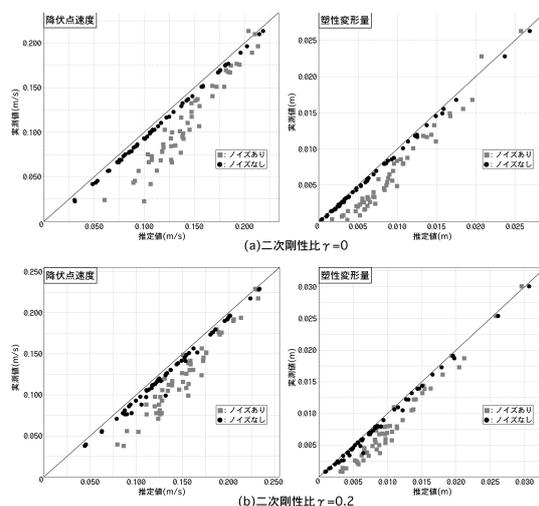


図4 推定精度

で、振動系が降伏した時点を●でそれぞれ示す。図3(a)、(b)より、二次剛性比 γ によらず、snapの値が瞬間的に大きくなり、ピークを生じている時点において、振動系が降伏していることがわかる。模擬的に設定したノイズではあるものの、ノイズの影響を低減し、振動系が降伏することによって生じる非線形性を十分に検出可能であることを示せた。

(2)降伏点速度と塑性変形量の推定

前節で示したように、snapの値が閾値を超えてピークとなる時点において、振動系が降伏したと判断することが可能となることから、降伏点における応答速度（降伏点速度）および塑性変形量を推定を手法を提案した。推定手法による降伏点速度および塑性変形量それぞれにおいて、横軸を推定値、縦軸を解析結果から得られる実測値として比較したものを図4に示す。図4より、ノイズがある場合は、ノイズなしと比較して、ばらつきが大きい。特に、降伏点速度および塑性変形量のどちらも、値が小さい範囲においてばらつきが大きい。一方で、値が大きい範囲では、20%程度の誤差で推定可能である。

(3)残留変形の推定

一般的に、加速度記録から積分によって変位を算出する際には、フィルタによる長周期成分を取り除く作業が行われる。しかし、この操作は塑性変形に関する信号も除去してしまうため、算出した変位には残留変形がほとんど現れない。ここでは、snapよって降伏点を検知し、降伏後の塑性変形を分離して積分することによって、残留変形を求める方法を提案

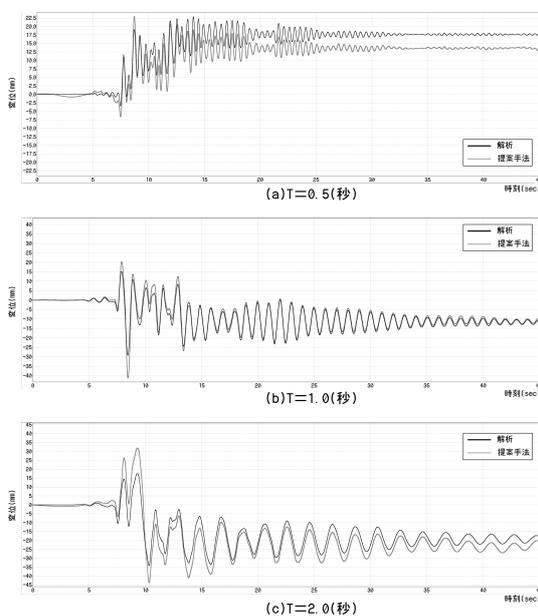


図5 変位応答波形の比較

し、その推定精度を検証した。図1に示したバイリニア型の荷重変形関係を有する減衰1質点系モデルとする。固有周期 T は0.5、1.0、2.0秒の3種類、二次剛性比 $\gamma=0$ 、減衰定数 $h=0.02$ 、入力地震動はJMA Kobe (NS成分)とする。

加速度記録から予め長周期成分を取り除き、台形積分によって算出した変位応答波形に、snapによって降伏点を検知し、降伏点以降の加速度記録を積分することによって算出した塑性変形を足し合わせることで、残留変形を評価可能な変位応答波形を算出する。提案手法によって算出した変位応答波形を振動系の固有周期 T ごとに図5にそれぞれ示す。図5より、固有周期 T によらず、解析によって得られる変位応答波形を追跡できており、残留変形を概ね評価することが可能となっている。一方で、塑性変形を足し合わせているため、解析結果と比較して、塑性変形中の変位応答を過大評価する傾向があることがわかった。

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)

[学会発表] (計 5 件)

- ① 涌井将貴, 伊山潤: snapによる非線形性検出手法の閾値設定手法とその適用性検討 その1 閾値設定手法とその非線形性検出の適用範囲, 2017年度日本建築学会関東支部研究報告会, 2018, 東京都・千代田区.
- ② 涌井将貴, 伊山潤: snapによる非線形性検出手法の閾値設定手法とその適用性検討 その2 応答解析結果による検証, 2017年度日本建築学会関東支部研究報告会, 2018, 東京都・千代田区.
- ③ 伊山潤, 涌井将貴: snapによる非線形性検出手法の閾値設定手法とその適用性検討 その3 振動台実験結果による検証, 2017年度日本建築学会関東支部研究報告会, 2018, 東京都・千代田区.
- ④ 涌井将貴, 伊山潤: 加速度2階微分を用いた降伏点検出による残留変形の評価方法に関する考察, 2017年度日本建築学会大会, 2017, 広島県・広島市.
- ⑤ Masaki WAKUI, Jun IYAMA, Tsuyoshi KOYAMA: Estimate of Plastic deformation of Vibrational Systems Using the High-order Time Derivative of Absolute Acceleration, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017, Santiago (Chile).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

涌井 将貴 (WAKUI, Masaki)

新潟工科大学・工学部工学科・助教

研究者番号: 40778205