

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06286

研究課題名(和文) 加速度応答の非線形性検出による構造損傷推定法に関する研究

研究課題名(英文) Structural damage estimation by detecting nonlinearity in acceleration response

研究代表者

伊山 潤 (Iyama, Jun)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：30282495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：建物が地震動を受けて、構造部材がき裂や破断などの損傷を生じると、その瞬間に建物の特性が急激に変化するため、揺れに不連続性が生じる。この不連続性を検出し、構造部材の損傷を検出するため、本研究では揺れの加速度の二階微分(snap)を用いた検出手法を提案した。snapは簡易な数式で表されるため、どの程度の損傷が生じるとsnap値がいくつになるか、また損傷検出を行うためには計測ノイズをどの程度に抑える必要があるか、などを事前に推定することができる。この点はこの手法の大きな特徴である。本研究課題においては、この手法を振動解析や振動台実験の計測記録に適用し、概ね理論通りの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 building is subject to seismic ground motions and some of the structural members are damaged, the vibration characteristics of the building will change dramatically at that moment, causing discontinuities in the response. In this research, in order to detect this discontinuity and detect the damage of the structural member, a detection method using the second derivative of the acceleration, referred to as "snap", is proposed. Since snap is represented by a simple mathematical expression, the detection threshold and applicable range of the method can be easily calculated in advance. In this research project, this method was applied to the measurement record of vibration analysis and shaking table tests, showing that the detection result agreed with the theory.

研究分野：建築構造

キーワード：加速度応答 高次微分 損傷検知 地震

1. 研究開始当初の背景

建物耐震技術は、大地震被害の度に進化し、現在ではかなりの大地震に対しても、建物の倒壊を防ぐ技術がほぼ確立されている。しかし一方で、近年相次いでいる大地震に対しては、倒壊を防ぐことはできたものの、重篤な構造被害を受けた建物が多くあった。今後の発生が懸念されている首都圏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。このため、地震後即座に建物の安全性を判定し、避難および修復の意志決定を支援する技術が求められるようになってきている。

このようなニーズに応えるため、近年構造ヘルスマニタリング技術に注目が集まっており、多数の研究や実用例が発表されている。ただし、このような技術により計測した結果と、構造損傷あるいは残存性能との定量的関係についてはまだ十分明らかになったとは言えない状況にあり、前述したような応急危険度判定や被災度判定に広く用いられるまでには至っていない。

2. 研究の目的

構造物の損傷によって、荷重-変形関係になんらかの不連続性、または非線形性が生じると考えられる。この非線形性を建物応答加速度記録により検知しようとするものである。

本研究では、加速度の高次微分と振動系応答との関係を定式化し、非線形性の程度と加速度高次微分との対応関係を定量的に明確にすることにより、判定閾値の理論的設定を可能とすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 加速度の高次微分の定式化

加速度応答記録の高次微分を定式化し、振動系の履歴復元力と微分物理量との対応関係を明らかにする。本研究では主として2階微分(snap)を対象とし、差分方程式による数値微分を定式化する。snapは剛性変化率と速度の積に比例する項(非線形検出項と呼ぶ)を含むため、降伏、座屈、破断などの損傷時には、瞬間的に剛性が変化するため、snapはその瞬間に大きな値をとることが示される。

(2) 検出塑性率による閾値の設定

非線形性検出を行うためには、判定のための閾値を定める必要がある。ここでは、一定以上の塑性変形が生じた場合を検出することを目的とし、予め定めた塑性率によりsnap値を推定し、これによって閾値を設定する手法を示す。

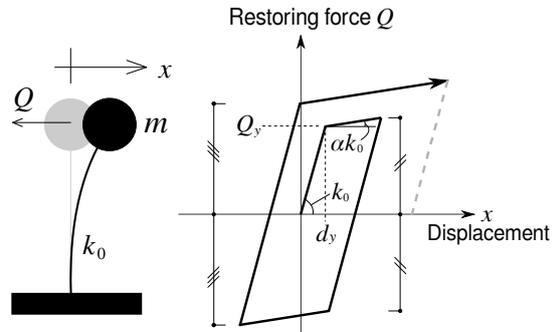


Fig. 1 対象とした振動系と荷重変形関係

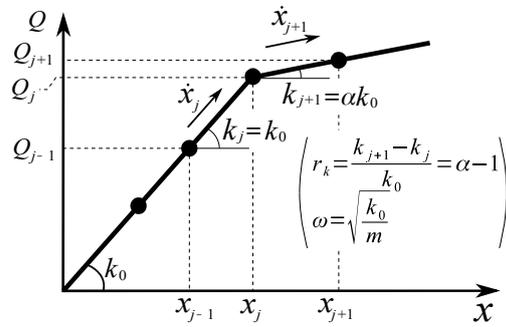


Fig. 2 離散時刻ステップにおける剛性変化

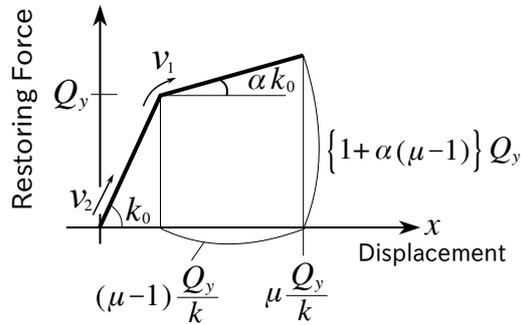


Fig. 3 検出すべき塑性率 μ の定義

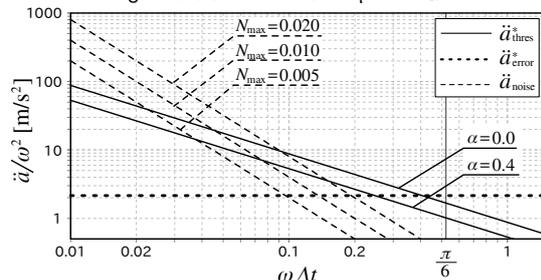


Fig. 4 検出可能範囲

(3) 検出可能範囲の明確化

snapには、非線形検出項のほか、弾性振動成分や、ノイズ成分を含み、これについても数式で示すことができる。非検出検出項の値が弾性振動成分およびノイズ成分よりも大きな時に非線形検出が可能となるため、これらの比較により非線形性検出可能範囲が数式および図により明示的に示される。

(4) 振動解析結果を用いた検証

前節の定式化によれば、検出の可否は振動系の固有周期や降伏耐力、記録に含まれるホワイトノイズ量などにより異なる。そこ

で、これらを様々に変化させた振動解析を多数おこない、応答加速度記録を得、その結果にホワイトノイズを加えて加速度計測記録を模擬する。この記録を用いて本検出手法を適用し、理論通りの検出が可能であることを検証する。

(5) 振動台実験結果を用いた検証

柱梁接合部、中脚部、1層骨組試験体、および多層骨組試験体を対象として、過去に行われた振動台実験で得られた加速度記録に本検出手法を適用し、実験で観察された損傷状況との比較により、検出精度の検証を行う。また、本手法によれば、検出可能な場合と検出不可能な場合をあらかじめ判定できる。この判定が正しく行われているかどうかについても併せて検証を行う。

4. 研究成果

(1) 加速度高次微分の定式化

Fig. 2に示されるように離散時刻歴記録の第 j ステップで系が降伏した場合を考える。このとき、 $k_0 = k_j \neq k_{j+1}$ となるため、絶対加速度 a_j の2階微分snap \ddot{a}_j は次式で表される。

$$\begin{aligned} \ddot{a}_j &= -\frac{(k_{j+1}-k_j)\dot{x}_{j+1}}{m\Delta t} - \frac{k_j\ddot{x}_j}{m} - \frac{c\ddot{x}_{j+1}}{m} \\ &= -\underbrace{\frac{\omega^2}{\Delta t} r_k \dot{x}_{j+1}}_{\text{非線形性検出項}} - \underbrace{\omega^2 \ddot{x}_j}_{\text{弾性応答項}} - \underbrace{2h\omega \ddot{x}_{j+1}}_{\text{減衰項}} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 r_k は剛性変化率、 ω は弾性時固有振動数、 \ddot{x} は相対加速度、 \ddot{x}_j は相対躍度、 Δt はデータの時間刻みである。

第一項は、剛性変化率と相対速度が共に大きい場合に大きな値となり、非線形性検出項となる。この項を次式のように書き換え、これを判定の閾値として用いる。

$$\text{閾値: } \ddot{a}_{\text{thres}}^* \equiv -\frac{\omega^2}{\Delta t} r_k v_1 \quad (2)$$

ここで v_1 は降伏瞬間の相対速度である。

一方、第二項および第三項は剛性の変化が生じなかったとしてもある範囲で振動するため、非線形性検出の観点からは誤差要因となるが、およそ次式の範囲内にあるものと推定できる。

$$\text{推定誤差: } \ddot{a}_{\text{error}}^* \equiv \omega^3 v_2 \sqrt{1+4h^2} \quad (3)$$

さらに、加速度記録に振幅 N_{max} のホワイトノイズが混入していた場合、snapの値には次の大きさのノイズが混入することになる。

$$\text{ノイズ: } \ddot{a}_{\text{noise}} = \frac{4}{\Delta t^2} N_{\text{max}} \quad (4)$$

(2) 検出塑性率による閾値の設定

Fig. 3に示すように、塑性率 μ を超える塑性変形を検出することを考える。降伏してか

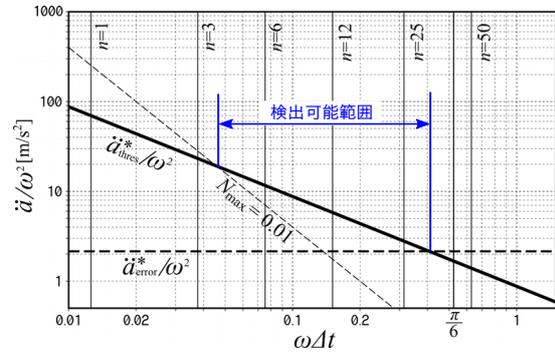


Fig. 5 検出可能範囲と間引き係数の関係

ら速度反転するまでのエネルギーを一定とすると、 v_1 は次式で計算される。

$$v_1 = \frac{c_1}{\omega} \quad (5)$$

ここで

$$Q_y = C_0 m g \quad (6)$$

$$c_1 = C_0 g \sqrt{2+\alpha(\mu-1)}(\mu-1) \quad (7)$$

これらを(2)式に代入することにより、判定の閾値 $\ddot{a}_{\text{thres}}^*$ が定められる。また、推定誤差 $\ddot{a}_{\text{error}}^*$ を求めるのに必要な v_2 は次式で推定される。

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + \frac{Q_y^2}{mk_0}} = \frac{c_2}{\omega} \quad (8)$$

ここで

$$c_2 = C_0 g \sqrt{2+\alpha(\mu-1)}(\mu-1)+1 = \sqrt{c_1^2 + C_0^2 g^2} \quad (9)$$

(3) 検出可能範囲の明確化

設定された閾値 $\ddot{a}_{\text{thres}}^*$ が推定誤差 $\ddot{a}_{\text{error}}^*$ およびノイズ \ddot{a}_{noise} を上回るとき、非線形性検出が可能であると考えられる。これらの関係の例をFig. 4に示す。図中の $\ddot{a}_{\text{thres}}^*$ の線が $\ddot{a}_{\text{error}}^*$ および \ddot{a}_{noise} を上回っている範囲が非線形性検出可能範囲である。 $\ddot{a}_{\text{thres}}^*$ については、二次剛性比 α が異なる2種類の線、 \ddot{a}_{noise} についてはノイズ振幅 N_{max} の異なる3種類の線を示している。この図からわかるように、二次剛性比が大きいほど、またノイズ振幅が大きいほど、適用範囲は狭くなることが理論的に示される。

この図から、検出を行うためには、この適用可能範囲となるように、時間刻み Δt を決める必要があることがわかる。データ計測の時間刻みがこの範囲よりも小さい場合には、間引き(デシメーション)を行って時間刻みを大きくすればよい。

(4) 応答解析結果による検証

本研究課題においては、1質点系、多質点系、および多層骨組系について、応答解析を行い、その結果を用いて本手法の検出精度検証を行った。本報告では例としてFig. 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質点系モデルを用いて検討結果を示す。振動系の弾性固有周期は1秒、検出すべき塑性率は $\mu=1.1$ 、応答加速度記録に含まれるノイズ振幅は $N_{\max}=0.01$ とした。この場合の検出可能範囲をFig.5中に矢印で示す。 $\omega\Delta t$ をこの範囲に入れることで、検出可能となる。入力地震動としては、El Centro NS波を用いた。応答解析を行った時間刻み Δt_0 は0.002秒である。 Δt_0 は0.002秒であるが、このデータから n 個ごとにデータを抽出することにより、 $\omega\Delta t$ を変化させることにする。図中には、縦線により $n=3$ 、 $n=12$ 、および $n=25$ にそれぞれ対応する $\omega\Delta t$ が表示されている。この図から、 $n=3$ では検出不可、 $n=12$ および $n=25$ では検出可能であることが推定される。

応答解析記録に本手法を適用して非線形性検出を行った結果をFig.6(a)~(c)に示す。各図には上下に2つの図が表示されている。上段の図はsnap時刻歴を示しており、水平の破線が検出判定の閾値 \dot{a}^*_{thres} を示す。下段の図は、荷重変形関係を示している。両図において、赤の丸印は、その点において非線形性を検出した点である。

$n=3$ の場合の結果であるFig.6(a)下段のグラフを見ると、荷重変形の様々なところに赤点が現れており、誤検出が多いことがわかる。これはFig.6(a)上段のグラフからわかるように、ノイズが大きいため非線形性検出項の値の変化が隠れてしまっているためである。前出Fig.5の検討から、 $n=3$ の場合には検出不可と推定したが、その結果と整合していることがわかる。

一方、 $n=12$ の場合の結果であるFig.6(b)下段図をみると、赤点は荷重変形関係の折れ点部に集中しており、非線形性を適正に検出していることがわかる。前出Fig.5からは $n=12$ では検出可能と推定したが、これも整合していることがわかる。

Fig.6(c)には $n=25$ の場合の検討結果を示す。より時間刻みが大きいため、さらにノイズの影響が低減するが、Fig.5からは検出可能と推定されており、完全には整合しないが、 $\omega\Delta t$ の値は検出可能範囲の端部に当たるため、誤検出が増えたものと説明される。

以上の判定結果はおよそFig.5により説明でき、検出可能範囲の両端では検出精度が低下する場合があるものの、検出可能範囲の中央付近であれば、適正な検出が可能であることがわかる。

(5) 振動台実験結果による検証

本研究課題においては、柱梁接合部、柱脚部、1層骨組試験体、および多層骨組試験体の振動台実験結果を用いて、本手法の適用

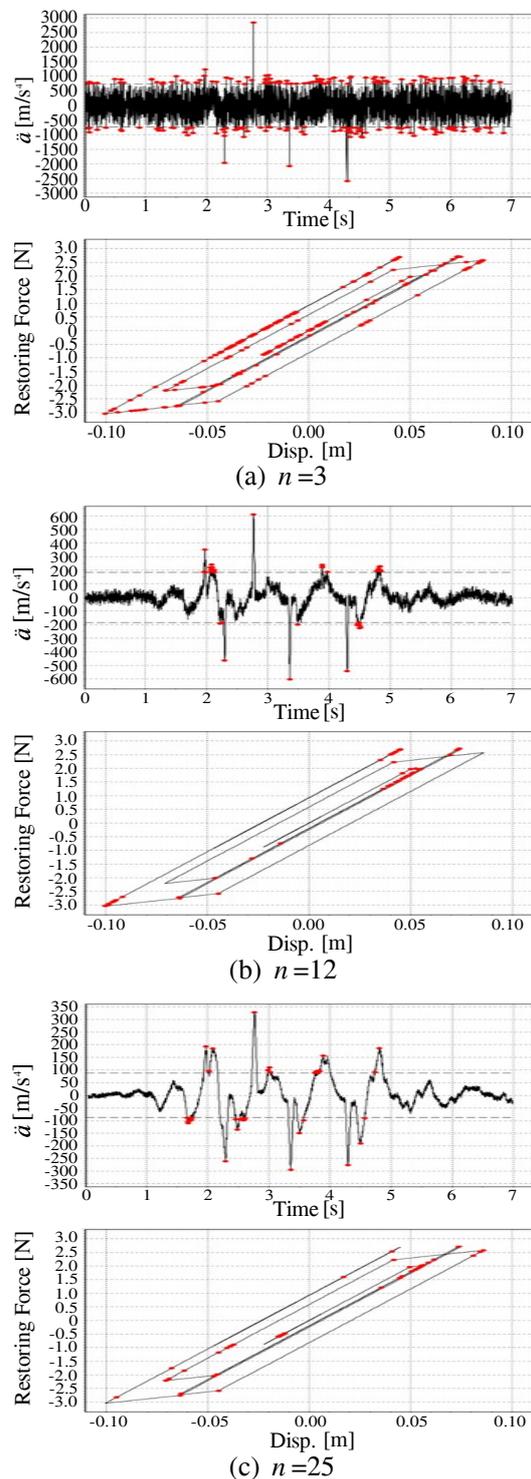


Fig. 6 応答解析結果を用いた非線形性検出結果

を検討した。ここで一例として、既往文献1)に示された柱梁接合部の振動台実験記録による検証を示す。試験体形状をFig.7に示す。これは地震による慣性力が柱梁接合部に加わった場合を模擬する振動台実験である。この実験で得られた加速度応答記録を2階微分してsnapを求め、前述した理論式に基づいて閾値を求めて、非線形性検出を行った。この結果をFig.8に示す。Fig.8上段に示したものが、実

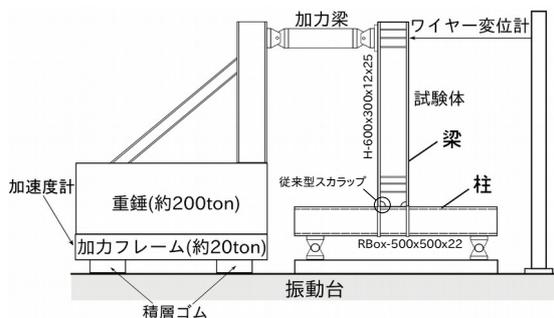


Fig. 7 対象とした振動台実験試験体 1) 図5に基き作成

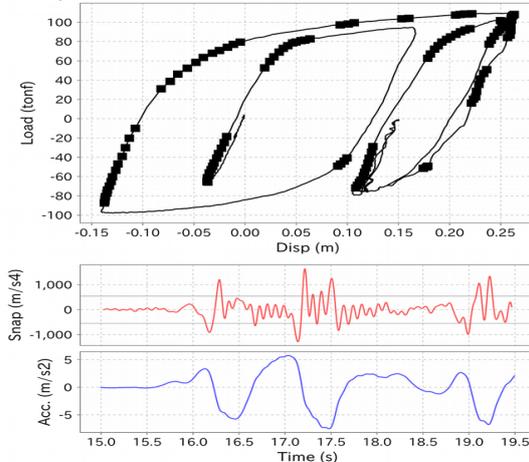


Fig. 8 非線形性検出結果

験で得られた荷重変形関係であり、黒い■としてプロットされている点が、非線形性が検出された点である。荷重変形が折れ曲がっている箇所プロットが現れており、非線形性を検出していることが確認される。ただし、除荷時あるいは塑性変形進行時にも検出点が現れている。これらの点でもなんらかの非線形性が生じたものとは考えられるが、検出を期待する損傷との関係は薄いものと考えられる。実際の応用に際してはこのような検出を排除する手法を確立し、適用性をより高めてゆく必要がある。

<引用文献>

- 1) 秋山宏, 山田哲, 松本由香, 松岡三郎, 小倉桂治, 北村春幸: 実大振動台実験による柱梁接合部の破壊性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 63(512), 165-172, 1998.

5. 主な発表論文等

(1) [雑誌論文] (計 2 件)

- ① 涌井将貴, 伊山潤: 加速度2階微分による振動系の非線形性検出手法におけるノイズ低減処理と検出精度に関する基礎的考察, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, pp.1799-1808, 2016, 査読有.
 ② 涌井将貴, 伊山潤: 絶対加速度の微分解析による剛性低下率の評価方法に関する考察, 鋼構造年次論文報告集, 第23

巻, pp.327-332, 2015, 査読有.

(2) [学会発表] (計 8 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 涌井将貴, 伊山潤: 加速度2階微分による降伏点における相対速度の推定に関する考察, 2016年度日本建築学会大会, 2016, 福岡県・福岡市.
 ⑥ 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).
 ⑦ 涌井将貴, 伊山潤: 絶対加速度の高次微分による非線形挙動検出手法におけるノイズ低減処理の妥当性に関する考察, 2015年度日本建築学会大会, 2015, 神奈川県・平塚市.
 ⑧ Masaki WAKUI, Jun IYAMA, Tsuyoshi KOYAMA: Detection of Non-linear Behavior in Exposed-type Column Bases Using the Second Time Derivative of Absolute Acceleration, 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas, 2015, Shanghai (China).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊山潤 (IYAMA, Jun)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号: 30282495