

ウェーブレット変換とジャークドットセンサ による履歴復元力特性を有する構造物の 塑性域突入回数の推定

橋本唯人¹・曾根彰²・増田新³

¹工修 京都工芸繊維大学大学院 工芸学部機械システム工学科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

²工博 京都工芸繊維大学教授 工芸学部機械システム工学科 (同上)

³工博 京都工芸繊維大学助教授 工芸学部機械システム工学科 (同上)

In this paper, we focus on the singularity, which appears in the acceleration response when the restoring force of structure enters into a plastic region from an elastic region. And we confirm experimentally that we can detect the occurrence time when the restoring force of structure enters into a plastic region using the wavelet transform and the prototype of jerk-dot-sensor. The experiment is carried out using the 5 th-story structural model installed by lead rubber bearing (LRB) with hysteretic characteristics of restoring force. The experiment results that wavelet transform and jerk-dot-sensor make it possible to estimate the number of entering to the plastic region, when a non-stationary wave is inputted into a structure.

Key Words : Health monitoring, Wavelet transform, Jerk-dot-sensor, Lead rubber bearing, Hysteretic characteristics of restoring force, Plastic region

1. 緒言

高層建築物のような構造物は地震などにより繰り返し荷重を受け、場合によってはこの累積によって使用不可能な状態に陥ることもある。このとき構造物内の部材では、弾性域から塑性域への突入が繰り返し行なわれ、クラックやき裂などの損傷が進展していると考えられる。そこで、本研究ではこの構造物内の部材が地震などにより弾性域から塑性域へ突入する際の発生する応答の不連続波形に着目し、この不連続波形を時々刻々と検出することにより塑性域への突入回数を推定する手法を実験的に検証する。

実験には、履歴復元力特性を有する鉛入り積層ゴム (LRB) が柱部分に挿入されている構造物モデルを用いた。推定方法としては、不連続波形検出にすぐれているウェーブレット変換^{1),2)}と微細な信号を検出できるジャークドットセンサ³⁾を用いて、構造物の履歴復元力が塑性域に突入するときに発生する応答の不連続波形を観測し、突入回数を推定する。

定常入力に対するウェーブレット変換による推定方法は瀬川ら^{4),5)}によってすでに行なわれている。そこで、本研究では入力波形として、EL Centro地震観測記録波形と神戸ポートアイランド地震観測記録波形を用い、非定常入力に対するウェーブレット変換の塑性域突入の時刻の検出能を確認する。また、

これまで構造物内の部材に存在するき裂の進展を対象にして、本研究室で開発してきたジャークドットセンサをこの実験に用い、ジャークドットセンサがこの塑性域突入回数の推定に適用可能かを検証する。

2. 理論

(1) バイリニア型モデル

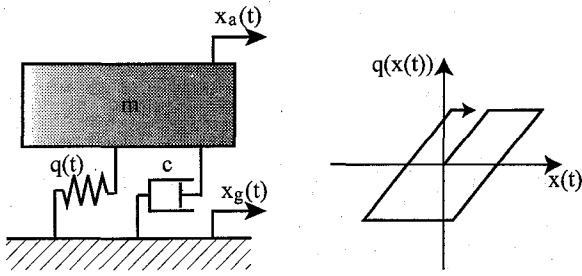
本研究では、履歴復元力特性を有する構造物が外力によって弾性域を超え塑性域に入る回数を推定することを目的としている。そこでまず、履歴復元力特性を有する構造物の応答がどのような挙動をするかを見るために、図-1で示すような履歴復元力特性をバイリニアモデルと仮定した1質点系モデルを用いて検討する。

このモデルの運動方程式は次式のようなになる。

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + q(x(t)) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

ここで、 $m, c, q(x(t))$ はそれぞれ質量、減衰係数、履歴復元力であり、 $x(t) (= x_o(t) - x_g(t))$ は構造物の相対変位、 $\ddot{x}_g(t)$ は入力加速度である。

式(1)から、絶対加速度応答とその1階導関数を式(2)、式(3)に示す。



(a) 物理モデル (b) 履歴復元力特性
図-1 バイリニアモデル

$$\ddot{x}_a(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = -\frac{c\dot{x}(t) + q(x(t))}{m} \quad (2)$$

$$\ddot{x}_g(t) = \ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t) = -\frac{c\dot{x}(t) + q(x(t))}{m} \quad (3)$$

$$\dot{q}(x(t)) = \frac{dq(x(t))}{dx} \dot{x}(t) \quad (4)$$

ここで、図-1(b)に示すように dq/dx は塑性域突入時に不連続に変化する。これより、この絶対加速度応答の1階導関数に現れる不連続波形を検出できれば、降伏点での不連続波が現れる回数がわかり、塑性域突入回数が推定できる。

(2) ウェーブレット変換による降伏点での不連続波形の検出

本研究では、次式のように表される連続ウェーブレット変換を用いて不連続波の検出を行なう。

$$Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

ここで、 a, b は共に実数であり、 $\bar{\psi}(t)$ は $\psi(t)$ の複素共役を表す。また、本研究ではアナライジングウェーブレットとして、次式のように表される Gaussian の 6 階微分のウェーブレットを用いた。

$$\psi(t) = \frac{d^6 \phi(t)}{dt^6}, \quad \phi(t) = e^{-t^2/2} \quad (6)$$

このアナライジングウェーブレットは 6 次のバニシングモーメントを持ち、次式のようなモーメント条件を満たす。

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^m \psi(t) dt = 0 \quad (0 \leq m \leq 5) \quad (7)$$

よって、式(5)、(6)を用い、さらにスケールパラメータ a をうまく選び、ウェーブレット変換することにより、6 階導関数の不連続点まで検出可能となる。すなわち、(1)節で示した降伏点での不連続波をウェーブレット変換を用いて検出できる。

(3) ジャークドットセンサによる降伏点の不連続波の検出

ジャークドットとは加速度を 2 階微分した量で、加速度の不連続波形を検出できる。

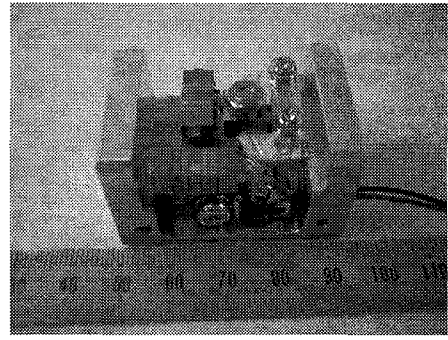


図-2 本研究で用いたジャークドットセンサ

ジャークドットセンサは図-2に示すように、片持ち梁と 2 つの加速度センサから構成されている。この片持ち梁の 1 次モードのみを考慮すると、1 質点系モデルとみなすことができる。この物理モデルの運動方程式は梁の質量を無視できると仮定すると次式のようなになる。

$$m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{z}_g(t) \quad (8)$$

ここで、式(8)を 2 階微分すると次式のようなになる。

$$m\ddot{\ddot{z}}(t) + c\ddot{\dot{z}}(t) + k\ddot{z}(t) = -m\ddot{\ddot{z}}_g(t) \quad (9)$$

図-2におけるそれぞれの加速度センサの出力の差、つまり、相対加速度を $y(t)$ とおけば、

$$y(t) = \ddot{z}(t) \quad (10)$$

となり、これを用いて式(9)を書き換えると、

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = -m\ddot{\ddot{z}}_g(t) \quad (11)$$

となる。 $z_g(t) = z_0 \sin \omega t$ とおくと、この解 $y(t)$ の振幅 Y は次式のように表される。

$$Y = \frac{-(\omega/\omega_0)^2 \omega^2 z_0}{\sqrt{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_0)^2}} \quad (12)$$

ここで、 ω_0 は片持ち梁の 1 次の固有振動数であり、 $\zeta = c/2\sqrt{mk}$ である。

よって、振幅 Y と入力ジャークドット $\ddot{\ddot{z}}_g(t)$ の振幅 $z_0 \omega^4$ との比をとり、 ω_0^2 を乗じたものは次式のようなになる。

$$\omega_0^2 \{Y/(z_0 \omega^4)\} = \frac{-1}{\sqrt{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4\zeta^2 (\omega/\omega_0)^2}} \quad (13)$$

式(13)において、 $\omega/\omega_0 \ll 1$ の範囲では右辺は 1 となるので、観測した相対加速度の振幅 Y を ω_0^2 倍すると、加速度の 2 階微分、つまり、ジャークドットが観測できることになる。

次に、図-2に示すジャークドットセンサのボード線図を図-3に示す。図-3において、ほぼ 20[Hz] ~ 500[Hz] で振幅倍率が一定になっていることがわかる。これより、本研究で用いたジャークドットセンサの有効な周波数帯域は、20[Hz] ~ 500[Hz] 程度であると考えられる。

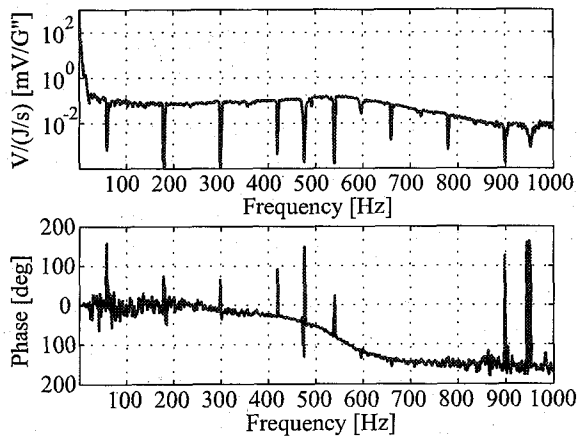
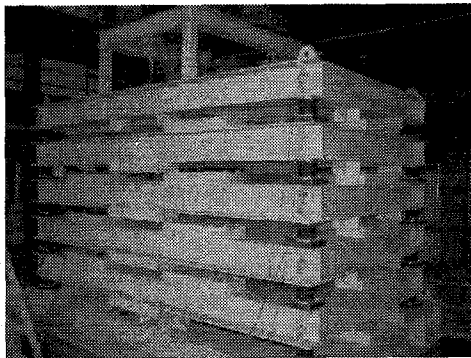
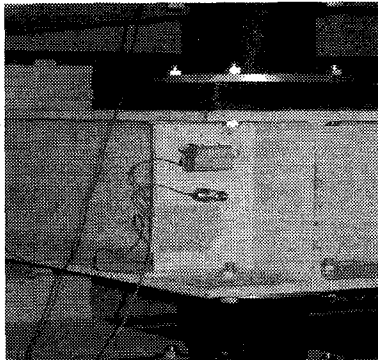


図-3 ジャークドットセンサのボード線図



(a) 構造物モデルの全体図



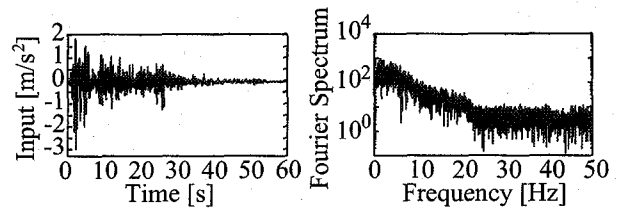
(b) ジャークドットセンサ取り付け位置

図-4 構造物モデルの外観

3. 振動実験

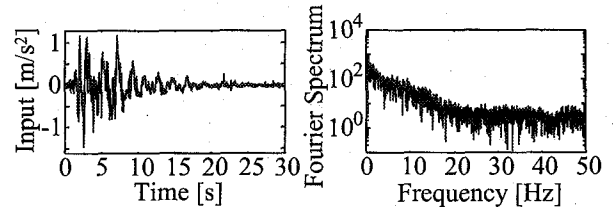
(1) 実験概要

本研究で用いた構造物モデルを図-4に示す。この構造物は5層からなり、高さ2.3[m]、幅3.5[m]、奥行き2.0[m]である。また、1層目と3層目の柱部分に履歴復元力特性を持つ鉛入り積層ゴム(LRB)が挿入されており、他の柱部分は線形ゴムが挿入されている。図-4(a)において、5層目の質量部分にはAM



(a-1) 入力波形 (a-2) 周波数特性

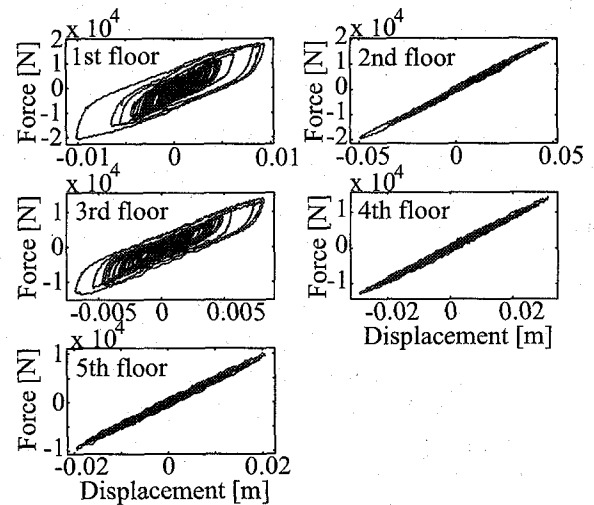
(a) EL Centro 地震観測記録波形



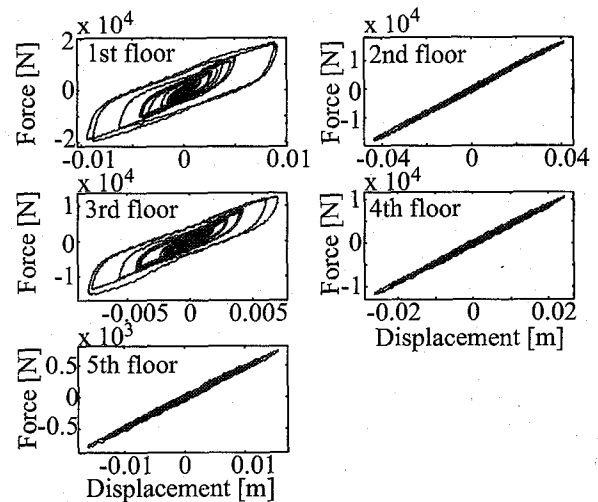
(b-1) 入力波形 (b-2) 周波数特性

(b) 神戸ポートアイランド地震観測記録波形

図-5 入力加速度波形



(a) EL Centro 地震観測記録波形



(b) 神戸ポートアイランド地震観測記録波形

図-6 履歴復元力ループ

Dダンパが設置されているが今回の実験では使用していない。ジャークドットセンサは図-4(b)のように3層目の柱付近のスラブ部分に取り付けている。また、入力波形は加速度入力としてEL Centro地震観測記録波形と神戸ポートアイランド地震観測記録波形を用いた。これらの入力波形を図-5(a), (b)にそれぞれ示す。

次に、各層の履歴復元カーループを図-6に示す。図-6は予め各層間の相対変位応答を計測しておき、各層のスラブ部分の質量と絶対加速度応答から復元力を求め、履歴復元カーループを描いている。図-6より、LRBが挿入されていない2層目、4層目、5層目はほぼ線形的に振舞っているのに対し、LRBが挿入されている1層目、3層目では弾性域から塑性域へ入る様子がよくわかる。

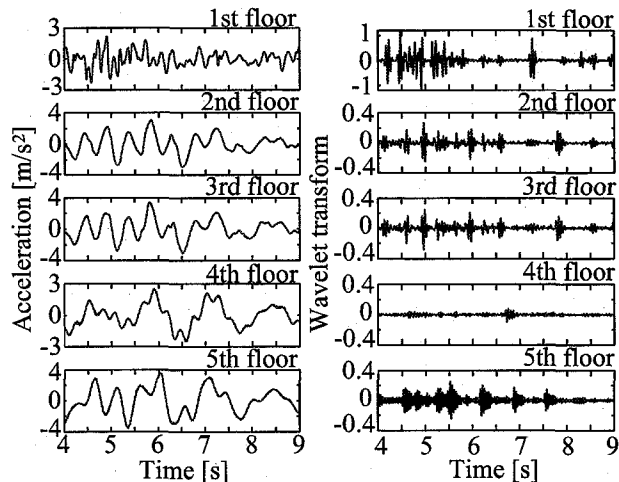
(2) 実験結果

本研究では、各層の絶対加速度応答のウェーブレット変換値と3層目に設置したジャークドットセンサ計測値から図-6で示される弾性域から塑性域への突入回数を推定する。ここで、本研究では図-6においてそれぞれの履歴復元カーループが最も大きくなっている前後の4~9[s]の範囲に着目した。この時間範囲での各層における絶対加速度応答とそのウェーブレット変換値を図-7に示す。図-7をみると、4層目と5層目のウェーブレット変換値には他の層とは異なり時間幅が広く、振幅の大きい波形が周期的に出ている。これは、センサワイヤの揺れなどの入力波形とは異なる外的要因が応答波形に表れてきていると考えられる。そこで、これらを考慮しないで、ウェーブレット変換値を見ると、線形に振舞う層ではスパイク波が見られないのに対し、LRBが挿入された付近の層では多くのスパイク波が現れている。これより、ウェーブレット変換値に現れるスパイク波から塑性変形した層がわかる。

次に、塑性変形をしていると考えられる1層目と3層目の相対変位応答と絶対加速度応答、絶対加速度のウェーブレット変換値を図-8、図-9に示す。ここで、図-8、図-9において、点線はウェーブレット変換値のスパイク波が現れた時刻を示している。また、3層目で計測されたジャークドットセンサの計測値も図-8、図-9にそれぞれ示す。

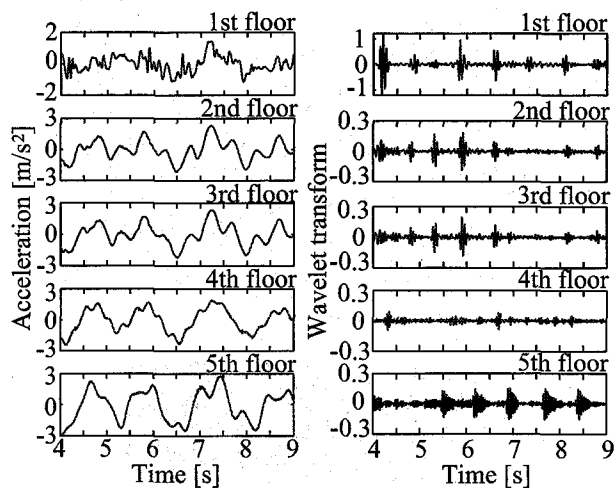
図-8に示すようにEL Centro地震観測波形を入力した場合、ウェーブレット変換値のスパイク波がノイズの覆われて検出が困難になっている時刻がいくつかある。この原因はこの時刻で、構造物モデルが今回用いたウェーブレットの中心周波数に近い周波数領域で振動していたためと考えられる。しかし、神戸ポートアイランド地震観測記録波形を入力した結果(図-9)を見ると、ウェーブレット変換値に多くのスパイク波が明らかに現れていることがわかる。

次に、スパイク波が示す時刻での構造物の挙動について考えるために、図-10に時刻4~9[s]の範囲での履歴復元カーループを示し、その上にウェーブレッ



(a-1) 絶対加速度応答 (a-2) ウェーブレット変換値

(a) EL Centro地震観測記録波形



(b-1) 絶対加速度応答 (b-2) ウェーブレット変換値

(b) 神戸ポートアイランド地震観測記録波形

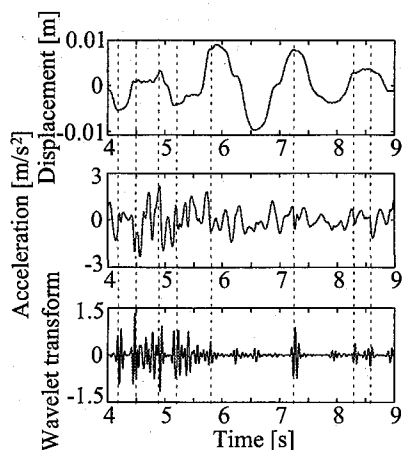
図-7 各層の絶対加速度応答とウェーブレット変換値

ト変換値のスパイク波が現れた時刻を●印で表す。図-10を見ると、●印の位置は弾性域から塑性域へ変わる点、つまり、降伏点ではなく、最大変位付近に多く集まっていることがわかる。これはLRBが持つ減衰力によってLRBが図-1(b)のようなバイリニア型の挙動をせず、降伏点で滑らかにつながることが原因であると考えられる。ここで、各周期での最大変位での挙動を調べるために、次式に表される式(2)の2階微分を考える。

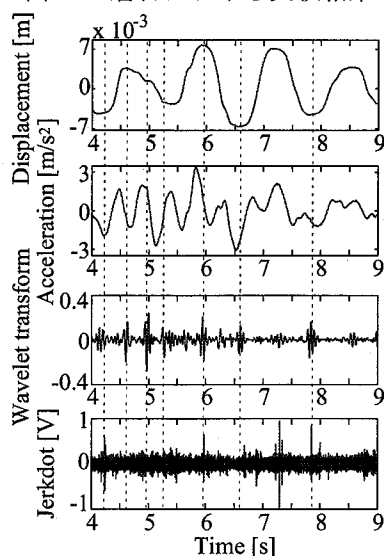
$$\ddot{x}_0(t) = -\frac{c\dot{x}(t) + \ddot{q}(x(t))}{m} \quad (14)$$

$$\ddot{q}(x(t)) = \frac{d^2 q(x(t))}{dx^2} \dot{x}^2(t) + \frac{dq(x(t))}{dx} \ddot{x}(t) \quad (15)$$

式(14)、式(15)において、各周期での最大変位では $\dot{x}(t)=0$ となるので、 dq/dx の影響により各周期での



(a) 1層目における実験結果



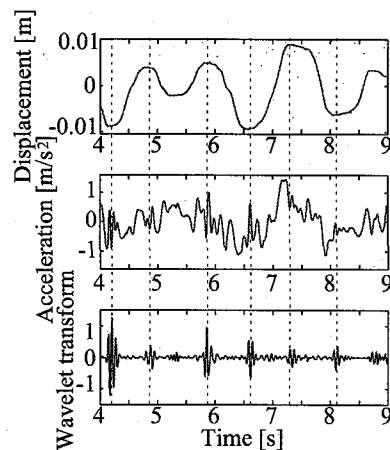
(b) 3層目における実験結果

図-8 EL Centro 地震観測記録波形を入力波形に用いた場合

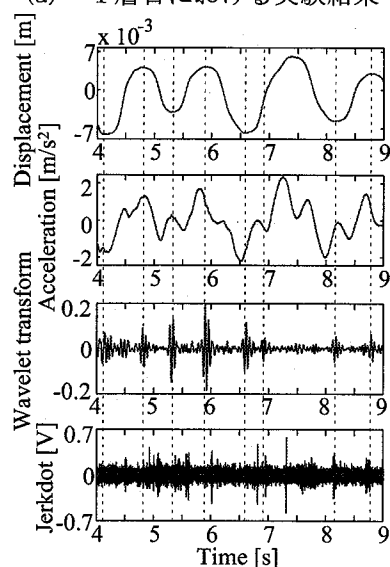
最大変位時刻で絶対加速度応答の2階導関数(ジャークドット)に不連続点が現れ、ウェーブレット変換はこの不連続点によって発生する過渡的な応答を捕らえていると考えられる。

これらの結果は弾性域から塑性域に突入する時刻を示す結果ではないが、図-7から構造物が線形の挙動を示すときウェーブレット変換値にはスパイク波が現れないため、塑性域への突入回数の推定はウェーブレット変換値のスパイク波が現れる時刻を検出することにより可能である。

ジャークドットセンサについては、図-8(b)、図-9(b)からわかるように、いくつかのスパイク波が見られるが、ウェーブレット変換値と時刻が一致しているものもあれば、一致しないものも多く存在するという結果になった。これは最大変位後に発生する過渡的な応答がジャークドットセンサの有効周波数帯域20~500[Hz]に対応していないためと考えられる。しかし、有効周波数帯域をうまくあわせることによって、塑性域突入回数の推定に用いることができると考えられる。

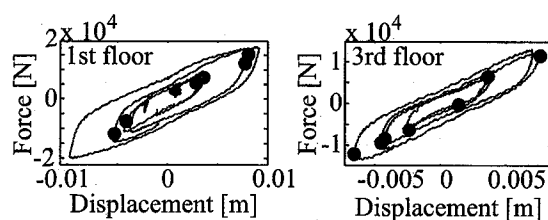


(a) 1層目における実験結果

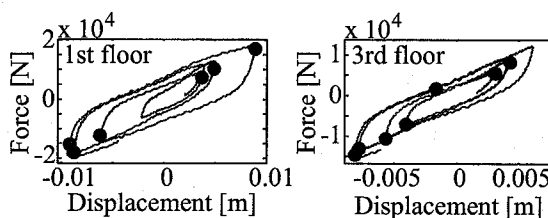


(b) 3層目における実験結果

図-9 神戸ポートアイランド地震観測記録波形を入力波形の用いた場合



(a) EL Centro 地震観測記録波形



(b) 神戸ポートアイランド地震観測記録波形
図-10 4~9[s]の範囲での履歴復元カループ

4. ジャークドットセンサの広帯域化

本研究では、現在ジャークドットセンサの有効な周波数帯域を広げることを試みている。そこで、ここでは新しく試作した2つのジャークドットセンサを紹介する。図-11に試作したジャークドットセンサの外観を示す。このジャークドットセンサは材質がアルミ合金でできており、高さ25[mm]、幅34[mm]、厚さ15[mm]である。図-12、13に新しいジャークドットセンサのボード線図を示す。これらのボード線図からジャークドットセンサの有効周波数帯域はジャークドットセンサAで400~2200[Hz]であり、ジャークドットセンサBでは500~4500[Hz]であることがわかる。

現在、これらのジャークドットセンサを用いた実験はまだ行っていないが、このジャークドットセンサを用いると高い周波数を有する不連続波形のモニタリングに大きな能力を発揮すると期待される。

5. 結言

本研究では、履歴復元力特性を持つ鉛入り積層ゴム(LRB)が柱部分に挿入された構造物モデルを用いて、地震波入力に対する構造物が弾性域から塑性域へ突入する時刻を絶対加速度応答のウェーブレット変換値とジャークドットセンサの計測値それぞれから検出して突入回数が推定できるかを検討した。

この結果、ウェーブレット変換を用いると、予想していた塑性域への突入時刻ではなく最大変位の時刻を検出するという結果となったが、構造物が線形の挙動を示すときウェーブレット変換値にはスパイク波が現れないため、ウェーブレット変換値のスパイク波を検出することにより塑性域突入回数を推定できることがわかった。

また、ジャークドットセンサについては、本研究で用いたジャークドットセンサの有効周波数帯域が検出しようとした波形の周波数に対応していないため、検出が困難となったが、有効周波数帯域をうまくあわせることによって、塑性域突入回数の推定に用いることができることがわかった。

さらに、現在ジャークドットセンサの広帯域化を試み、新しいジャークドットセンサを試作した。

参考文献

- 1) 橋本唯人, 増田 新, 曾根 彰, ウェーブレット変換による多自由度構造物の損傷検出, Dynamics and Design Conference 2003, CD-ROM集, No. 524, pp.1-6, 2003
- 2) 橋本唯人, 増田 新, 曾根 彰, ウェーブレット変換による構造物の損傷同定, Movic 第8回運動と振動の制御シンポジウム, CD-ROM集, PP.1-5
- 3) 松浦孝, ジャークドットセンサによる構造物の損傷検

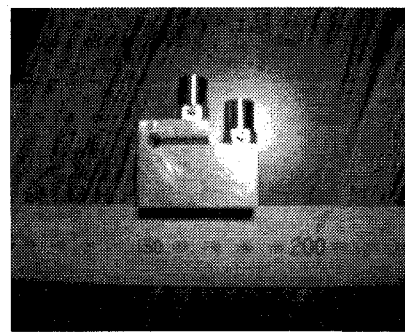
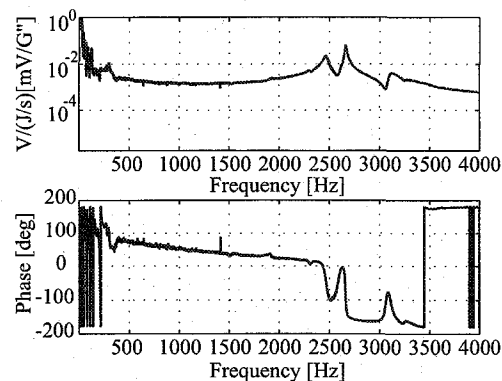
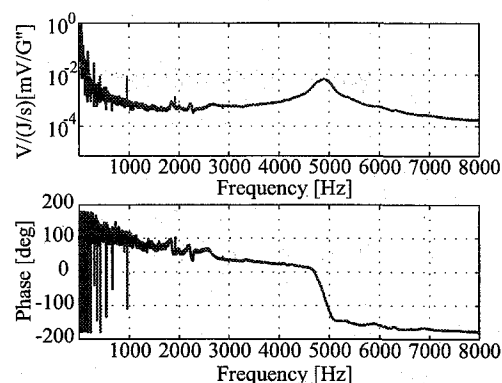


図-11 試作したジャークドットセンサの外観



(a) 試作したジャークドットセンサA



(b) 試作したジャークドットセンサB

図-12 試作したジャークドットセンサのボード線図

出, 京都工芸繊維大学 平成14年度修士論文, pp.1-31, 2003

- 4) R. Segawa, A. Sone, S. Yamamoto and A. Masuda, Experimental study of cumulative damage detection in hysteretic structures using wavelet analysis of acceleration response, Proceedings of the ASME PV&P Conf., Seismic Engineering, PVP-Vol. 402-2, pp.127-135, 2000.
- 5) R. Segawa, S. Yamamoto, A. Sone and A. Masuda, Cumulative damage estimation using wavelet transform of structural response, Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, No. 1212, pp. 1-8, 2000.