

同期された加速度計測に基づいた復元力特性の計測方法の開発

Development of a measurement method of restoring force characteristics based on synchronized accelerometers

本多 弘明*・堀 宗朗**

Hiroaki HONDA and Muneo HORI

*正会員 工博 国土交通省 国土技術政策総合研究所 研究官 (〒 305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

**正会員 Ph.D 東京大学地震研究所 教授 (〒 113-0032 東京都文京区弥生一丁目 1-1)

This paper proposes a method of measuring restoring force characteristic by means of acceleration data, in order to make urgent diagnosis for structures possibly damaged by an earthquake. The relation is measured by calculating relative displacement from acceleration time series that is measured by synchronized accelerometers. A sensor system has been installed in a building for a few years, and it was shown that a restoring force characteristic of this building is measured by processing the data observed. Numerical simulation which uses a multi-degree-of-freedom system was made. It was shown that the proposed method is capable to detect non-linear restoring force characteristics by locating accelerometers at every other mass.

Key Words : *urgent seismic damage diagnosis, restoring force characteristic, numerical integration*

1. はじめに

我が国で発生する自然災害の中でも、地震災害は社会活動に与える影響が大きいものである。とりわけ、大地震が発生した際に、我が国の経済活動の連続性を確保することは我が国の経済的競争力を保つために必要なことである。地震災害が発生した際に各事業主体の意思決定者が必要とする情報は多岐にわたり、例えば、公的機関を例にとると、社会を構成するハードウェアである、交通システム・河川・海岸などの各社会基盤施設の健全性の診断を迅速に行うことが、応急対応に使用可能なリソースの配分を決定する際に必要となる。現在、このような大地震時の被災状況の把握として、専門家による目視や応急危険度判定士による判定¹⁾が行われているが、人力に頼る方法では迅速性は十分ではなく、診断結果も必ずしも客観的とは限らない。特に広域を襲う巨大海溝型地震に対しては、診断すべき構造物の数が膨大であり、迅速性に欠ける診断方法に頼るべきではない。

代替案として、各構造物に計測システムを設置し、計測されたデータを分析することで迅速かつ定量的に損傷状況を把握する方法が考えられる。計測システムは構造物の維持管理にも利用され、構造モニタリングとして研究が進められている。構造モニタリングでは、計測データから構造物の固有周期を求める方法^{2),3),4)}が開発されている。固有周期や対応する振動モードの変化を指標として、構造物の損傷を評価することは成功している。一方、構造物や部材の力学的モデルは力と変位の関係すなわち復元力特性で表現される。震動台

を使った加振実験では、構造物や部材の損傷は復元力特性の非線形性をもって判定される。計測は、ロードセルと変位計で行われることが多い。計測された復元力特性が非線形となったりヒステリシスを描く場合、非弾性的な応答として損傷が判定されるのである。加振実験に倣えば、構造物や部材の復元力特性がモニタリングできることが望ましいと考えられる。しかし、中低層構住宅や橋脚などの構造物を対象とした場合、このモニタリングを実現するシステムは開発されていない。

上記を背景として、本研究は、複数の同期された加速度計を使った計測システムを利用して、構造物の復元力特性を計測する手法を提案する。時刻同期をとった加速度計の時系列データから変位と復元力を計算し、復元力特性を計測するのである。復元力特性は、例えば制震ダンパーなど新規に開発された構造部材の性能を調査する目的で行われる震動台実験の結果について考察する際に材料として用いられることが多い⁵⁾。本研究の新規性は、実構造物に地震波が入力した際に震動台実験と同じ精度で復元力特性を計測し、損傷度診断に用いることを目標としているところである。

本論文の構成は以下の通りである。第 2 章において計測方法の定式化を示す。第 3 章において実構造物に設置された加速度計の計測システムを使った復元力特性の計測結果を示す。約 3 年にわたってほぼ線形の復元力特性が計測された。非線形の復元力特性が計測可能であることを示すため、第 4 章で多質点系モデルを使った数値実験を行う。一つおきに加速度計を配置することで非線形の復元力特性が計測可能であることを示す。

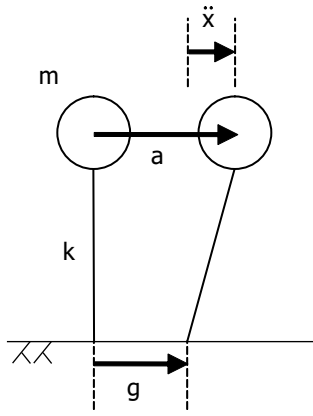


図-1 1自由度系モデル．

2. 復元力特性の計測方法

本章では，線形 1 自由度系モデルを例に，時刻同期をとった 2 つの加速度計を使った復元力特性の計測方法の定式化を示す．

例とする線形 1 自由度系モデルを図-1 に示す．質点の質量を m ，バネの剛性を k ，質点の位置を 1 次元の座標 $x(t)$ で表すと，次の運動方程式が成立する．

$$m \ddot{x}(t) + F(t) = -m g(t) \quad (1)$$

ここで $F(t)$ はバネの復元力であり，バネが線形弾性域にある場合は

$$F(t) = k x(t) \quad (2)$$

として与えられる． $g(t)$ は入力地震動の加速度である．

時刻同期をとった 2 つの加速度計を使って，入力加速度 $g(t)$ と質点の加速度 $a(t) = \ddot{x}(t) + g(t)$ が計測されることを仮定する．式 (1) より復元力 $F(t)$ は

$$F(t) = -m a(t) \quad (3)$$

となる．質点の速度 $v(t)$ と変位 $x(t)$ は計測された $a(t)$ と $g(t)$ の差を使って

$$v(t) = \int_{t_0}^t a(t) - g(t) dt \quad (4)$$

$$x(t) = \int_{t_0}^t v(t) dt \quad (5)$$

として計算される．実際にデジタルデータを積分する手法として，台形近似に基づいて積分する方法⁶⁾やデジタルフィルタを使って積分する方法⁷⁾などがある．式 (3) の $F(t)$ と式 (5) の $x(t)$ の間には式 (2) の線形関係が成立する． m が不明である場合， $(x(t), -a(t))$ を平面にプロットすると傾き k/m の直線が得られる．実際，変形が小さく線形弾性域にある場合に $(x(t), -a(t))$ は一直線に乗る．しかし変形が大きく非弾性域に入ると $(x(t), -a(t))$ はこの直線から外れる．これが復元力特性を使った損傷の判定である．

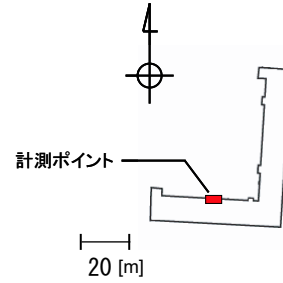


図-2 計測対象となった住宅の概形．

復元力特性に粘性の効果がある場合でも計測は可能である．線形の粘性 c を仮定し式 (2) を

$$F(t) = k x(t) + c v(t) \quad (6)$$

とする．ここで $v(t)$ は速度である ($v(t) = \dot{x}(t)$)．この場合，計測された $g(t)$ と $a(t)$ から $x(t)$ と $v(t)$ を計算し $(x(t), -a(t) - c/m v(t))$ をプロットすると傾き k/m の直線が得られる．なお m と c が不明であるため， c/m は別途決定する必要がある．

3. 復元力特性の計測の例

時刻同期をとった加速度計から構成される計測システムを実構造物に設置し，2005 年より約 3 年間，地震応答を計測した⁸⁾．対象構造物は宮城県仙台市太白区の 11 階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅である．図-2 に示すとおり住宅は L 字型をしており，計測ポイントは南側の棟の中央付近に設定されている．1 階と 11 階の倉庫を利用して加速度計を 1 階床・1 階天井・11 階床に設置し，さらにローカル収集装置を設置して遠隔地でのデータ回収が可能なシステムを構成した (図-3 参照)．加速度計は有線で結ばれており，1 階床に設置されている加速度計が 5[Gal] の閾値を超えた場合にデジタル出力信号を ON し，その他の加速度計のデジタル入力信号がそれを受信することで計測を開始するといった，デジタル信号による同期がとられている．精度としては， $\pm 0.6[\text{ms}]$ 以下の誤差で多点間の時刻同期がとられている．

1 階床と 11 階床の加速度の時系列データから構造物の復元力特性を計測する．変位は遮断周波数 0.2[Hz] のハイパスフィルタを用いた時間積分から計算される．遮断周波数の決定には同一型の加速度計を対象とした震動台実験の結果を参照した⁹⁾．例として大中小の 3 つの地震動が入力された場合の復元力特性を図-4 に示す．応答加速度は $10^0 \sim 2[\text{Gal}]$ と広範囲であるが，計測された復元力特性はほぼ直線となっている．この図の復元力特性は主震動方向のものである．本研究では，水平面内の相対変位ベクトルのノルムが最大となる方向を主震動方向としている．入力地震動が大きい場合，EW 成分と NS 成分の復元力特性は線形となるが，地震動

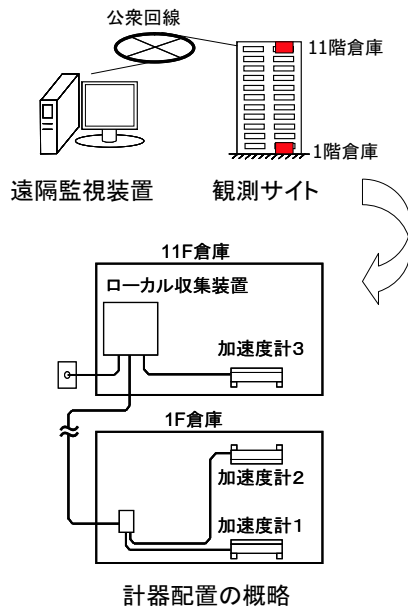


図-3 計測システムの概略。

が小さい場合には復元力特性の線形性はさほど明瞭ではない。

主震動方向に変換することで

復元力特性がほぼ直線となることから、剛性に対応する傾きを計算する。時刻 t_n の相対変位と推定される復元力を (x_n, F_n) とし、推定誤差を次のように定義する。

$$E = \sum_n (a_n - F_n)^2 \quad (7)$$

復元力特性が変位の線形関数として仮定される場合、すなわち

$$F = Kx \quad (8)$$

の場合を考える。ここで K は未知の剛性である（正確には剛性を質量で除した値 $K = k/m$ ）。この場合、誤差 E は K の関数となり、この E を最小にする K は次のように計算される。

$$K = \frac{\sum_n a_n x_n}{\sum_n x_n^2} \quad (9)$$

復元力特性が変位と速度の線形関数として仮定される場合、すなわち、

$$F = Kx + Cv \quad (10)$$

の場合、 E は未知の剛性 K と粘性 C の関数となる。しかし、 C を加えても E を最小とする K の値はさほど変わらず、また E の最小値もさほど小さくはならなかった。このため C は無視することとする。

計測された地震応答と剛性 K （表中では傾きと表示）と誤差 E を表-1 に示す。この表には

$$E^{rel} = \sqrt{E} / \sqrt{\sum_n a_n^2} \quad (11)$$

として定義される相対誤差も載せている。ここで、 $[Gal] = [cm/s^2]$ である。

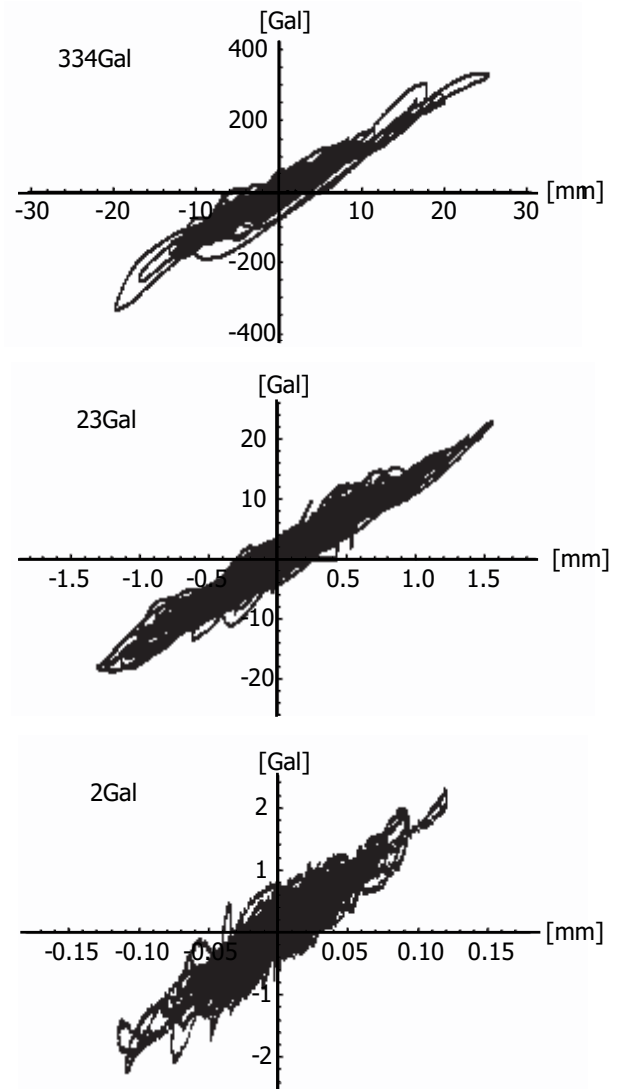


図-4 復元力特性の計測結果。

本研究で使用されたサーボ型加速度計では、時間積分によって計算される変位には最大 $1[mm]$ 程度の誤差が含まれている⁹⁾。しかし、図-4 に示すように、最大変位応答が $1[mm]$ 以下の地震動でも、復元力特性は直線となっていた。これは変位の誤差が応答加速度の大きさに依存するためであり、応答加速度が小さい場合は、相対的に変位誤差は小さくなると考えられる。

4. 加速度計の設置方法

前章の実構造物の場合、計測された復元力特性は構造物全体を一つの部材とした場合に対応し、層間の壁や柱といった、一つの部材として扱う単位での復元力特性ではない。この点を考慮し、本章では、多質点系モデルを使った数値計算を行い、各質点を結ぶバネの復元力特性を計測する手法について検討する。

日付	応答 加速度 [Gal]	傾き [s ⁻²]	相対誤差	誤差 [Gal ²]
2005/08/16	334.1	130.1	0.24	9.33
2005/10/19	29.2	133.3	0.20	1.03
2005/10/22	17.5	137.7	0.29	0.83
2005/11/01	11.0	141.8	0.21	0.26
2005/12/02	22.9	140.1	0.24	0.96
2005/12/05	15.7	147.8	0.18	0.49
2005/12/17	42.3	149.1	0.21	1.21
2006/01/18	16.7	152.2	0.29	0.71
2006/03/28	3.6	135.7	0.30	0.17
2006/03/29	7.4	136.4	0.47	0.35
2006/04/02	12.6	157.1	0.17	0.21
2006/04/10	11.7	143.2	0.44	0.40
2006/07/06	9.0	152.8	0.31	0.31
2006/09/09	10.7	158.2	0.27	0.41
2007/03/25	3.2	84.5	0.37	0.22
2007/03/31	10.4	147.7	0.28	0.32
2007/04/03	1.8	5.8	0.95	0.18
2007/04/05	14.1	167.0	0.29	0.41
2007/04/11	1.4	2.5	1.00	0.17
2007/04/14	2.3	150.7	0.39	0.12
2007/05/29	6.6	162.4	0.54	0.28
2007/06/16	3.4	125.9	0.37	0.17
2007/07/16	11.6	122.7	0.38	0.77
2007/11/26	26.0	155.5	0.21	0.73
2007/12/25	16.4	160.7	0.27	0.64

表-1 計測された地震応答と剛性・誤差．

4.1 定式化

N 自由度系モデルを例に，N 個のバネの復元力特性を計測する手法の定式化を示す (図-5 参照)．応答は 1 方向とし， α 番目の質点の変位を x^α ， $\alpha-1$ と α 番目の質点を結ぶバネの復元力を F^α とすると， α 番目の質点の運動方程式は

$$m^\alpha \ddot{x}^\alpha(t) + F^\alpha(t) - F^{\alpha+1}(t) = -m^\alpha g(t) \quad (12)$$

となる．なお， F^α はバネ定数を k^α とすると，線形弾性域においては

$$F^\alpha = k^\alpha (x^\alpha - x^{\alpha-1}) \quad (13)$$

である．勿論， x^0 は入力地震動 g に対応する変位であり， $F^{N+1} = 0$ である．

α 番目の質点の加速度が a^α として計測される場合，最も上の N 番目の質点の運動方程式から，

$$F^N(t) = -m^N a^N(t) \quad (14)$$

となる．一方， $N-1$ 番目と N 番目の間にあるバネの速度と変位は計測された a^N と a^{N-1} の差を使って

$$\dot{d}^N(t) = \int_{t_0}^t a^N(t) - a^{N-1}(t) dt \quad (15)$$

$$d^N(t) = \int_{t_0}^t \dot{d}^N(t) dt \quad (16)$$

として計算される．したがって $(d^N, -a^N)$ を平面にプロットすると， $N-1$ 番目の質点と N 番目の質点をつな

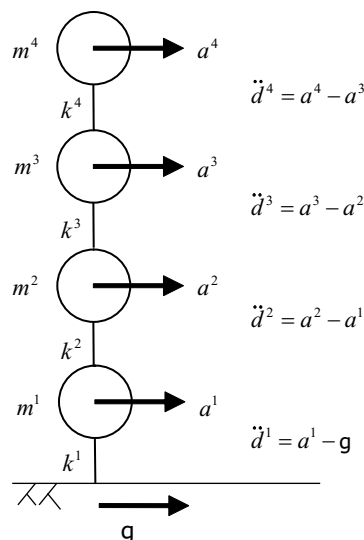


図-5 多質点系モデル．

ぐバネの復元力特性として傾き k^N/m^N の直線が計測されることになる．上のバネから順にこの操作を繰り返すことで， α と $\alpha-1$ 番目の質点を結ぶバネの復元力特性が計測されることになる．例えば式 (12) より

$$F^\alpha(t) = - \sum_{\beta=\alpha}^N m^\beta (\ddot{x}^\beta(t) + g(t)) \quad (17)$$

が導かれる．質点の質量が既知の場合， $\sum_{\beta=\alpha}^N m^\beta a^\beta$ が復元力を与える．未知の場合，質量が同一であることを仮定すると， $A^\alpha = \sum_{\beta=\alpha}^N a^\beta$ が復元力となる．相対変位は

$$d^\alpha(t) = \int_{t_0}^t \int_{t_0}^t a^\alpha(t) - a^{\alpha-1}(t) dt dt \quad (18)$$

である． $(d^\alpha, -A^\alpha)$ をプロットすることで復元力特性が計測される．

1 質点系モデルと同様，多質点系モデルでもバネが非弾性域に達すると， $(d^\alpha, -A^\alpha)$ から得られる復元力特性は非線形になる．非線形の復元力特性が計測されたことから，対象となるバネに損傷が発生したことや，その程度が判定できる．なお，質点を結ぶバネの非線形とは別に粘性がある場合でも，1 質点系モデルと同様に判定することは可能である．

4.2 加速度計の配置

全てのバネの復元力特性を計測するためには，全質点に加速度計を配置する必要がある．一方，復元力特性が線形域からずれるような塑性化を判定するためには，全ての質点に加速度計を設置しなくとも良いことが考えられる．塑性化の判定に必要な最小限の加速度計の配置を調べることを目的として，本章では，数個おきの質点に加速度計を設置した多質点系モデルを

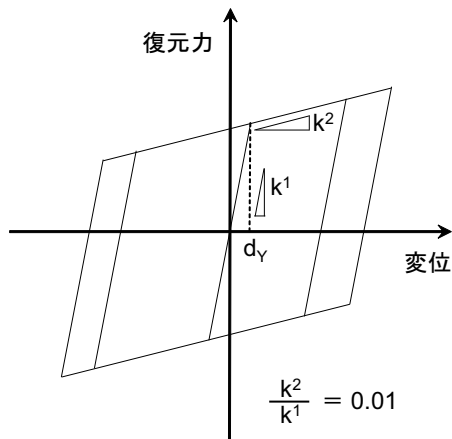


図-6 バネの剛性。

使った数値実験を行う。バネの剛性モデルとして、バイリニア型のモデルを使用した。初期剛性と塑性化後の剛性の比が 0.01 となるように設定して計算を行った（図-6）。数値計算の実装を行う際、¹⁰⁾を参照した。

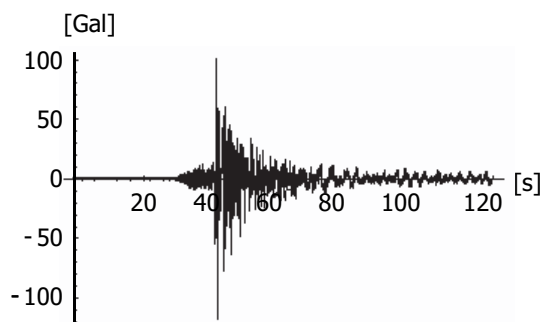


図-7 入力地震動（2008 年岩手・宮城内陸地震）。

数値実験では、前章で説明した実建造物の 1 階床に設置された加速度計において 2008 年岩手・宮城内陸地震で観測された地震動を入力する。地盤と 1 番目の質点の間のバネに約 50%の塑性率となる塑性変形が発生するように、地震動の振幅を調整する。図-7 に 2008 年岩手・宮城内陸地震の場合の入力地震動を示す。この地震波は、前章で説明した観測サイトの 1 階床に設置した加速度計で観測されたものである。

(1) 2DOF モデルを対象とした数値実験

最初に地盤と 2 つの質点に加速度計が配置された場合を想定する。ここでは、2 自由度系を仮定している。各層の質量・減衰定数・初期剛性は全て $100[\text{kg}]$ 、 0.02 、 $25.1[\text{kg/s}^2]$ とし、継続時間 $120[\text{s}]$ 、初期変位 $0[\text{cm}]$ 、初期速度 $0[\text{cm/s}]$ 、塑性変位 $4.0[\text{cm}]$ として計算した。数値計算の精度を調べるため、質点に働く加速度とバネの変位を直接プロットした復元力特性を真の復元力特性として図-8 にプロットする。ここで、 $[N] = [\text{kg} \cdot \text{m/s}^2]$

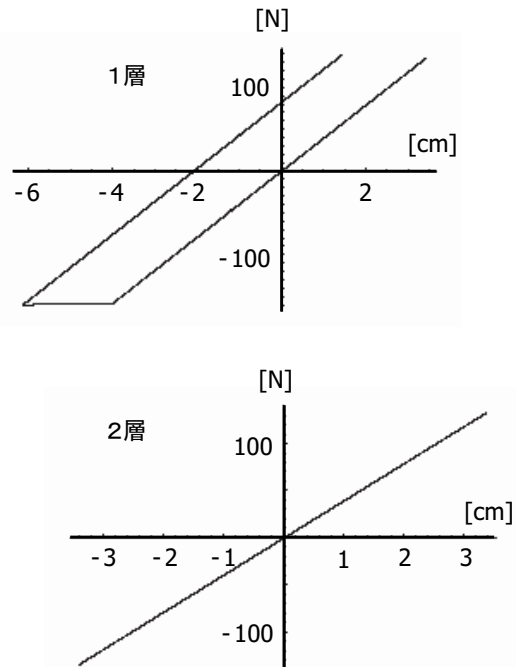


図-8 真の復元力特性。

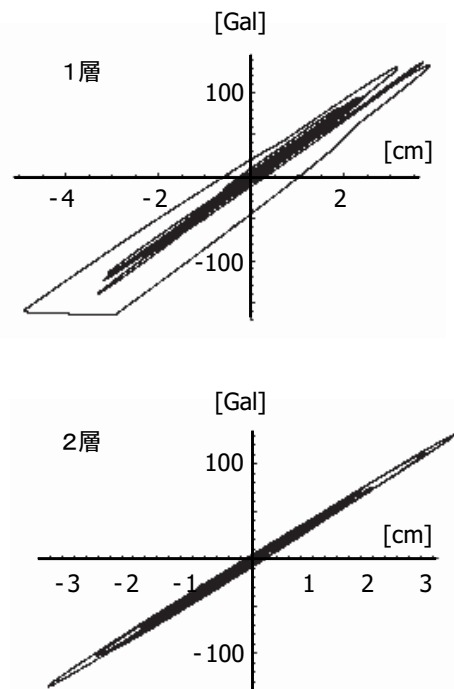


図-9 計測された復元力特性。

である。以降、数値計算の解から得られた復元力特性のことを真の復元力特性と呼ぶことにする。復元力特性の計測方法に基づいて、加速度の時間積分によって計算された相対変位をプロットした復元力特性を図-9 に示す。積分の方法は前章で示した方法と同様である。これらの図から、地盤と 1 番目の質点を結ぶバネが約 50% 塑性化していることが分かる。

次に地盤と2番目の質点のみに加速度計が配置された場合を想定する。2質点系モデルが1質点系モデルに置き換わったことになり、2つのバネと1つの質点が置き換わった1質点系のバネとなる。このバネの復元力特性を計測することになる。2つのバネの復元力の平均と数値実験から直接得られた相対変位から描かれる復元力特性を図-10に、2番目の質点の加速度と加速度の時間積分から計算された相対変位から描かれる復元力特性を図-11にプロットする。実際には、2質点系モデルの地盤と1番目の質点を結ぶバネが塑性化しているが、この図からは塑性化の判定は難しい。

2質点系モデルの応答は2つのモードが重なることを考慮し、1次モードの抽出を試みる。図-12に示すように、加速度と相対変位のフーリエスペクトルには1次モード以外の成分が多く含まれている。1次モード周辺($\pm 0.5[\text{Hz}]$)の周波数帯域のみを抽出して得られた加速度と相対変位のプロットを図-13に示す。2つの平行な直線とその直線をつなぐ楕円状の曲線が現れ、塑性化を検知することが可能である。応答が非線形域に達した場合、モード分解が妥当でないことは事実である。しかし、強引ではあるが、1次モードを抽出することで塑性化を示す程度に復元力特性が計測されたと考えられる。ただし、入力地震動の性質によっては、2次モードが卓越するケースも想定される。このような極端なケースでは、この1次モードを抽出する方法は機能しないことが想定される。同様に時間積分によって計算された相対変位から2次モードの周波数成分を除き1次モードを抽出した復元力特性を図-14に示す。積分の方法としてフーリエ変換を利用した方法を用いているために永久変位の影響が現われず、計測された復元力特性に相当の誤差はあるが、塑性化の判定は可能である。参考のため、塑性化が起こった時刻付近の加速度と計算された相対変位のプロットを図-15に示す。塑性化の時点で復元力特性が直線からずれることは明瞭に示されている。

(2) 4DOFモデルを対象とした数値実験

次に、4自由度モデルを対象とした数値実験を同様に行った。

各層の質量・減衰定数・初期剛性は全て $50[\text{kg}]$ 、 0.02 、 $25.1[\text{kg/s}^2]$ とし、継続時間 $120[\text{s}]$ 、初期変位 $0[\text{cm}]$ 、初期速度 $0[\text{cm/s}]$ 、塑性変位 $4.0[\text{cm}]$ として計算した。

各層間を結ぶバネの復元力と数値計算の結果として得られた相対変位から描かれた復元力特性を図-16に示す。1層目で約50%塑性化が生じている一方、他の層に関しては、弾性域で挙動していることが判る。また、加速度を時間積分して得られた相対変位を基に描かれた復元力特性を図-17に示す。いずれのタイプに関しても、2自由度モデルの場合と同様に、各層で計測すれば復元力特性から塑性化を判定可能となっている。

次に、2層ごとに計測した場合に関して、復元力の平

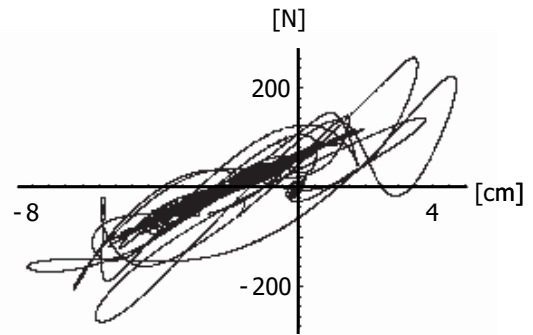


図-10 2質点系モデルを1質点系モデルとみなした時の真の復元力特性。

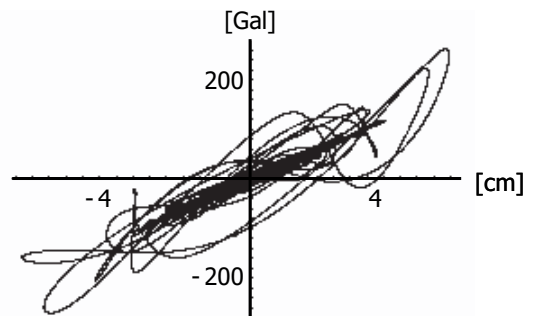


図-11 2質点系モデルを1質点系モデルとみなした時の計測された復元力特性。

均値と計算結果として得られた相対変位を基に描いた復元力特性を図-18に示す。この図から数値計算の結果を用いれば塑性化の有無を判定することが可能であることが判る。従って、精度良くこの相対変位と復元力を近似できていれば同様な結果が実計測結果からも得られるはずである。そこで、2番目の質点の加速度と加速度を時間積分して得られた相対変位を基に描かれた復元力特性を図-19に示す。3層+4層の復元力特性が直線的である一方で、1層+2層の復元力特性は幅を持っている。これは塑性化を反映していると考えられる。

次に、1次モードに対応する周波数帯域の抽出を行う。1次モードに対応する周波数から $\pm 0.5[\text{Hz}]$ までのデータを抽出して復元力特性を描き直すと、図20が得られる。いずれの復元力特性もほぼ線形となっているが、1層+2層の方が少し非線形化しているように見える。1層目が塑性化している時刻における、真の復元力特性と計測された復元力特性を切り取ったものを図21に示す。塑性化している時刻に確かに計測された復元力特性が直線からずれていることが確認され、復元力特性の非線形性が塑性化を表現していることが示唆される。

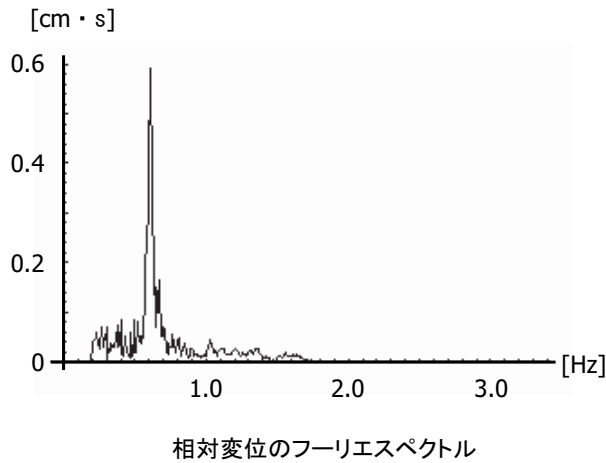


図-12 加速度と相対変位のフーリエスペクトル

5. おわりに

本研究では、地震時損傷判定を目的とした復元力特性の計測方法を提案した。主な成果を以下にまとめる。

1. 時刻同期を取る加速度計を複数配置することで、復元力特性を計測する手法を提案した。
2. 観測結果から実際に復元力特性が計測できることを示した。概ね直線であることから過度の損傷が起こっていないことが示唆される。
3. 多質点系モデルでは、全質点に加速度計を配置することで非線形となる復元力特性が計測できることを数値実験によって示した。2層・4層でモデル化される構造物に対して、1つおきの質点に配置しても塑性化の判定は可能であることを示した。

本研究では復元力特性の計測方法の提案を行った。実用化を視野に入れると、実際の計測環境を再現した数値計算により、本方法がどのような範囲で適用可能であるかを知ることが必要である。例えば、加速度データにノイズが含まれている場合や、構造物振動に捩れ成分が加わっている場合の検討が必要である。また、システム設計として、加速度計測システムから即座に損

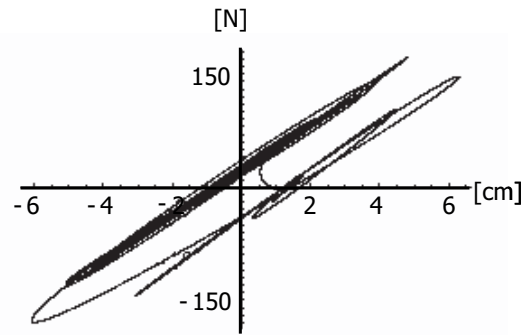


図-13 1次モードから得られる真の復元力特性

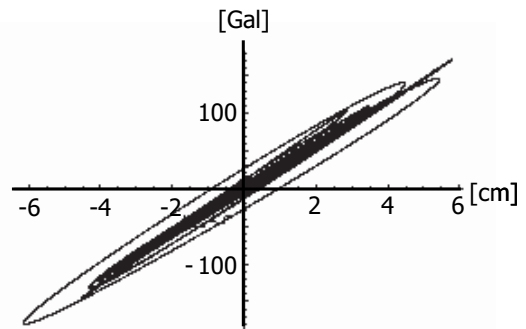


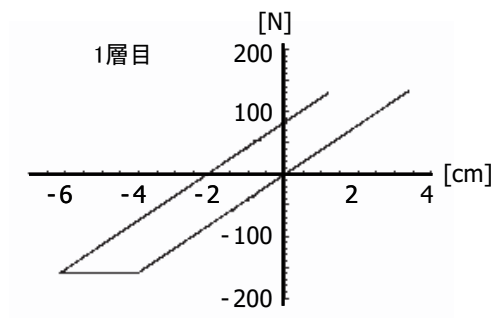
図-14 1次モードを使って計測された復元力特性

傷度指標が出力可能なシステムの構築が必要である。

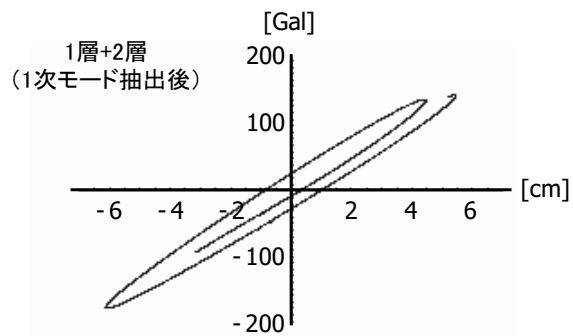
参考文献

- 1) 全国被災建築物 応急危険度判定協議会, (財)日本建築防災協会ホームページ.
- 2) 濱本卓司・森田高市・勅使川原正臣『複数モードの固有振動数変化を用いた多層建築物の層損傷検出』日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.93-100, 2002
- 3) 桐田史生・金澤健司・森清宣貴・北村春幸『建築物の地震損傷検知のための適応回帰型システム同定』日本建築学会構造系論文集, No.619, pp.65-72, 2007
- 4) 濱本卓司・森田高市・相馬澄子『逐次最小二乗法による多層建築物の地震損傷追跡』日本建築学会構造系論文集, No.603, pp.39-46, 2006
- 5) 森山圭吾・小林嵩明・安達洋・中西三和・北嶋圭二『二方向制震ダンパーを組み込んだ立体骨組みの振動台実験に関する研究 その2 実験結果』日本建築学会大会学術講演梗概集, No.21389, pp.777, 2007.8.
- 6) 大崎順彦『新・地震動のスペクトル解析入門』鹿島出版会, 2004
- 7) 鈴木崇伸・堀宗朗・古川洋之『デジタルフィルターによる変位計算と精度の検証』応用力学論文集, Vol.10, pp.631-638, 2007.
- 8) 古川洋之, 大浦肇, 田久保光『構造物の健全性評価のための多点同期地震加速度計測システムの研究』山武グループ技術研究報告書, Vol.48, pp.22-29, 2006.
- 9) 本多弘明, 堀宗朗, 鈴木崇伸, 古川洋之『同期された加速度計を使った実構造物の復元力特性の計算手法の開発』応用力学論文集, Vol.11, pp.929-936, 2008.
- 10) Anil K.Chopra 著, 渡部丹・石山祐二 監訳『構造物の動的解析』科学技術出版, 2002

(2009年4月9日 受付)



真の復元力特性



計測された復元力特性

図-15 塑性化した時刻付近の復元力特性 .

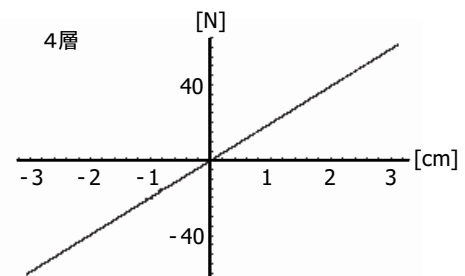
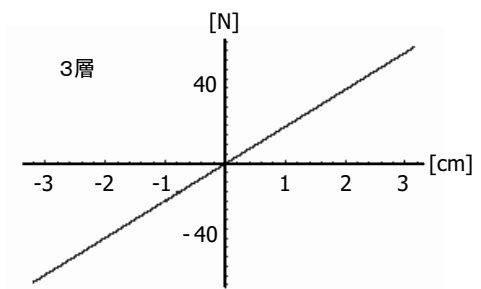
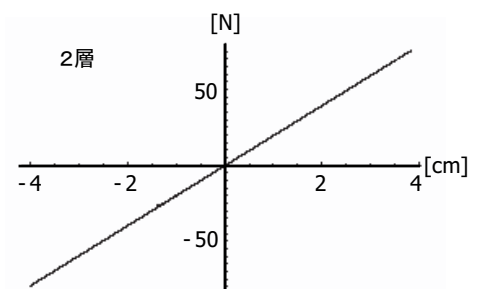
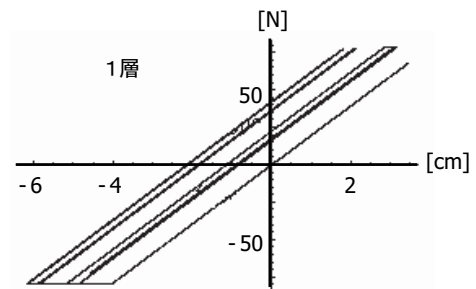


図-16 真の復元力特性 (4 質点系モデル) .

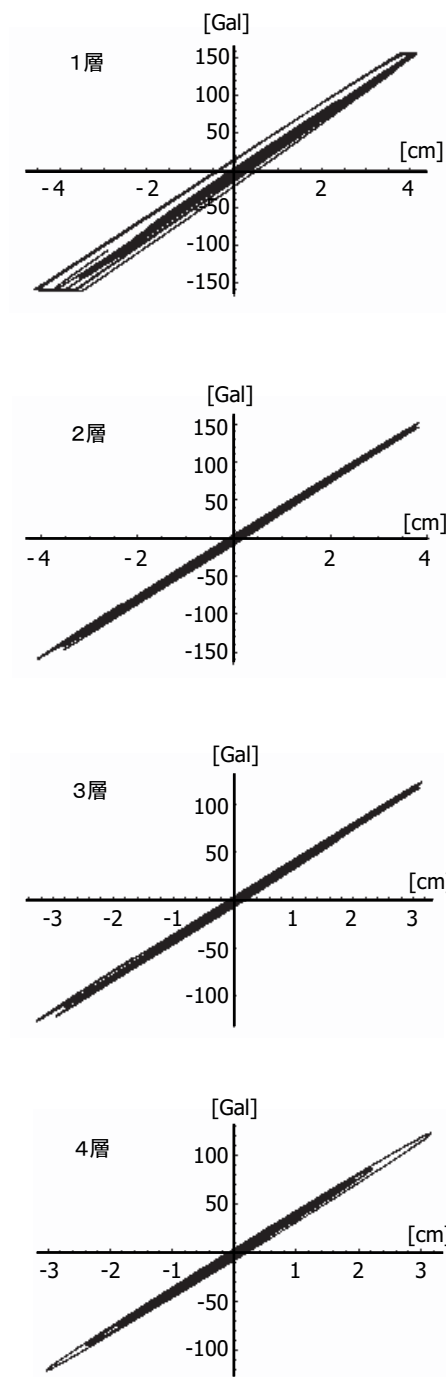


図-17 計測された復元力特性（4 質点系モデル）.

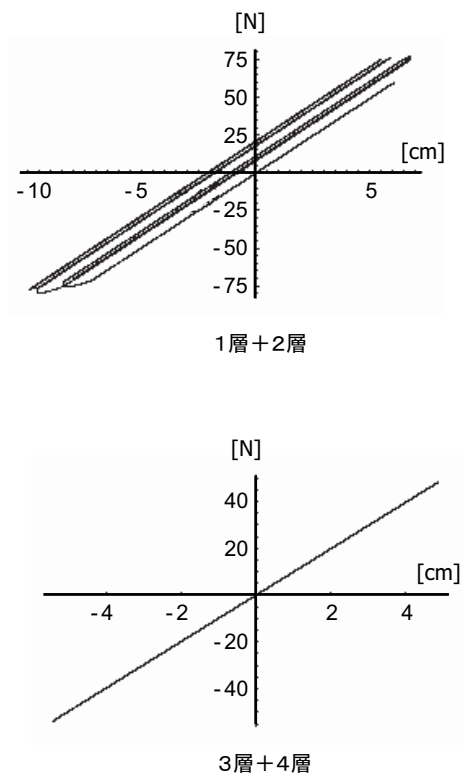


図-18 4 質点系モデルを 2 質点系モデルとみなした時の真の復元力特性.

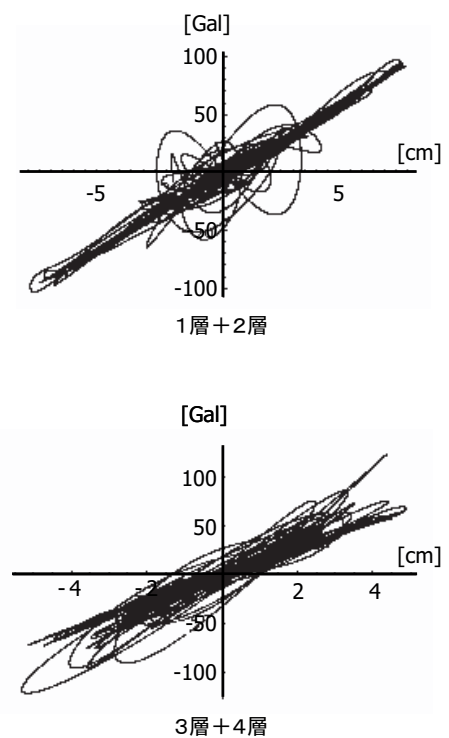
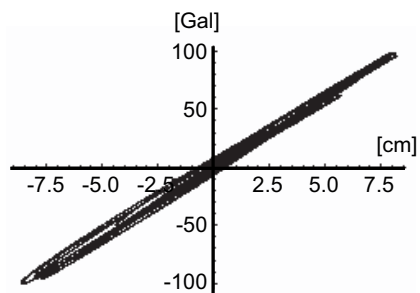
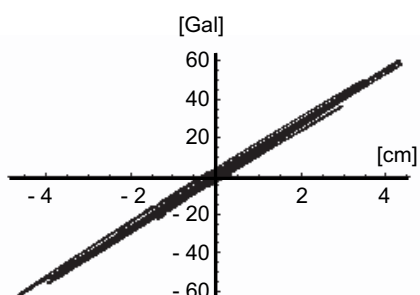


図-19 4 質点系モデルを 2 質点系モデルとみなした時の計測された復元力特性.

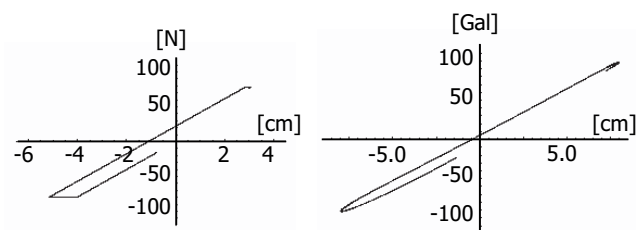


1 層 + 2 層

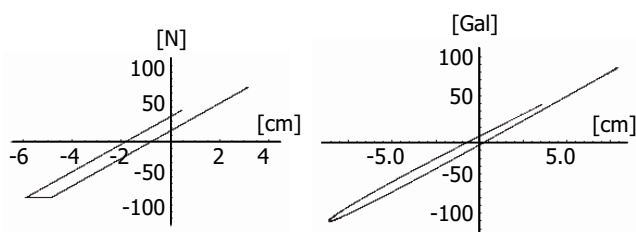


3 層 + 4 層

図-20 1 次モードから得られる真の復元力特性.



73.9 [s] ~ 76.3 [s]



100.3 [s] ~ 102.7 [s]

真の復元力特性

計測された復元力特性

図-21 1 次モードから得られる計測された復元力特性.