

地震被害応急判定を目的とした 建造物の復元力特性の計測方法の開発

本多 弘明¹・堀 宗朗²

¹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)

²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)

建造物の地震損傷度診断を目的として、加速度データのみから建造物の復元力特性を計測する方法を提案した。この方法は、時刻同期をとった加速度計の時刻歴データから計算される変位を使うものである。実建造物に計測システムを設置し4年以上の観測を行ったところ、計測された加速度から復元力特性が計測できることが確認された。多質点系モデルを使った数値実験により、提案した復元力特性の計測方法によって、非線形の復元力特性が計測可能であることを示し、さらに損傷判定に必要な加速度計の設置条件を検討した。多質点系モデルの各質点に加速度計を設置せずとも、1質点おきに設置することで、非線形の復元力特性が計測できることが示唆された。

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

1. はじめに

大地震が発生した際、被災建造物の被災度の迅速な診断は重要な課題である。現在、大地震時の被災状況の把握は、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、診断すべき建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、各建造物に計測システムを設置し、計測されたデータに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。計測システムは建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、計測データから建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、建造物の損傷を評価することは成功している。しかし損傷が比較的大きい場合であり、局所的な損傷の診断は難しい。

震動台を使った加振実験では、建造物のモデルや部材のモデルの損傷は復元力特性を使って判定される。復元力特性は、ロードセルと変位計を使って計測される力と変位の関係であり、これ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。加振実験に倣えば、建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が、実建造物にロードセルや変位計を設置すること

は現実的ではない。

上記を背景として、本研究は、安価な加速度計を使った計測システムを利用して、建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を計算し、加速度を力とみなし、この変位と力の関係から復元力特性を計測するのである。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章において実建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。

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。

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

ここで $F(t)$ は

$$F(t) = kx(t) \quad (2)$$

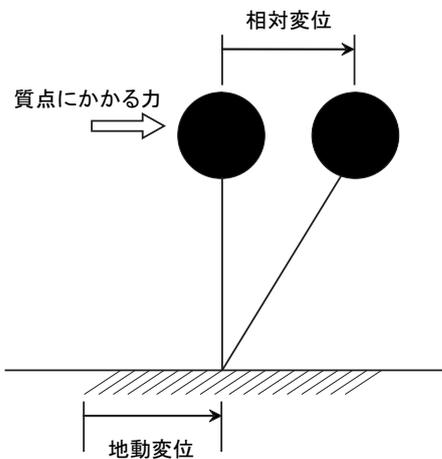


図-1 1自由度系モデル．

として与えられるバネの復元力であり， $g(t)$ は入力時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 $a(t) = \ddot{x} + g(t)$ が計測されることを仮定する．式(1)より復元力 F は

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

となる．質点の変位は計測された $a(t)$ と $g(t)$ の差を使って

$$x(t) = \int \int a(t) - g(t) dt dt \quad (4)$$

として計算される．式(3)の $F(t)$ と式(4)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．実際の構造物の復元力特性は線形とは限らない．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．

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

$$F(t) = k x(t) + c v(t) \quad (5)$$

とする．ここで v は速度である ($v(t) = \dot{x}(t)$)．この場合，計測された g と a から x と v 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．対象構造物は11階建ての鉄筋コンク

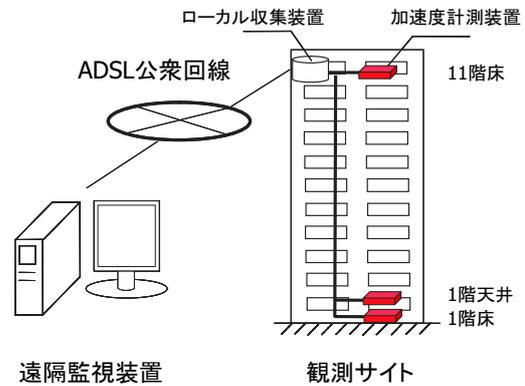


図-2 計測システムの概要．

リート造集合住宅である．1階床・1階天井・11階床に3軸サーボ型加速度計を設置した(図-2参照)．加速度計は有線で結ばれており， $\pm 0.6[\text{ms}]$ の精度で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 $0.2[\text{Hz}]$ のローカットフィルタを用いた時間積分から計算される．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-3に示す．大中小の地震動は11階で計測された最大加速度が $334, 23, 2[\text{Gal}]$ である．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．

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．

$$E(K) = \sum_n (a_n - F_n)^2 \quad (6)$$

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

$$F = K x \quad (7)$$

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．

$$K = \frac{\sum_n a_n x_n}{\sum_n x_n^2} \quad (8)$$

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，

$$F = K x + C v \quad (9)$$

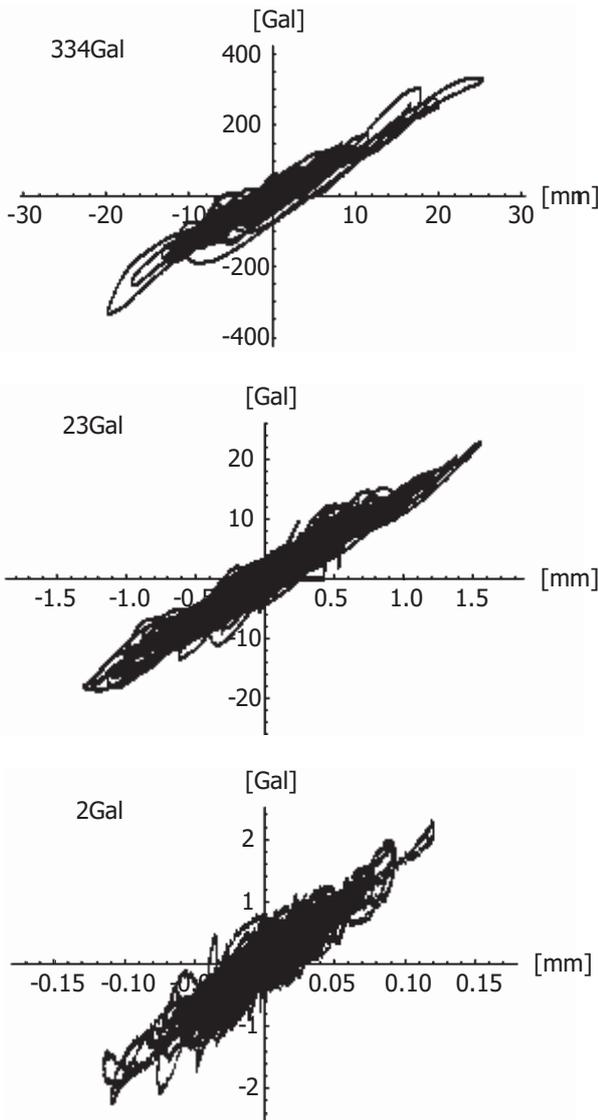


図-3 計測データから求まる復元力特性の例。

の場合、 E は未知の剛性 K と粘性 C の次の関数となり、誤差は

$$K = \frac{\sum_n a_n v_n \sum_n x_n v_n - \sum_n a_n x_n \sum_n v_n v_n}{(\sum_n x_n v_n)^2 - \sum_n x_n x_n \sum_n v_n v_n},$$

$$C = \frac{\sum_n x_n v_n \sum_n a_n x_n - \sum_n x_n x_n \sum_n a_n v_n}{(\sum_n x_n v_n)^2 - \sum_n x_n x_n \sum_n v_n v_n} \quad (10)$$

の時に最小となる。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。

本研究で使用されたサーボ型加速動計では、時間積

日付	応答 加速度	傾き	相対誤差	誤差
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。

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。しかし、図-3 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。なお、入力地震動が大きいうちに計測された復元力特性では、水平方向に数 [mm] 程度の幅が変位にあり、これは震動台実験の誤差程度である。

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に対応し、層間の壁や柱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を提案する。

(1) 定式化

線形の 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-4 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

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

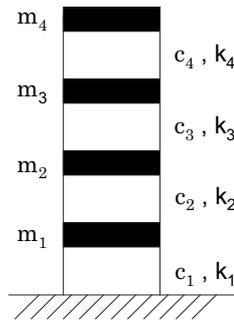


図-4 多質点系モデル.

となる．なお， F^α はバネ定数を k^α とすると

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

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 番目のバネの変位は計測された a^N と a^{N-1} の差を使って

$$x^N(t) = \int \int a^N(t) - a^{N-1}(t) dt dt \quad (15)$$

として計算される．したがって (x^N, a^N) を平面にプロットすると，最上の質点をつな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し (x^α, a^α) をプロットすることで， 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

$$F^\alpha(t) = \sum_{\beta=\alpha}^N m^\beta (\ddot{x}^\beta(t) + g(t)) \quad (16)$$

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

$$x^\alpha(t) = \int \int a^\alpha(t) - a^{\alpha-1}(t) dt dt \quad (17)$$

である． (x^α, A^α) 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， (x^α, A^α) 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．

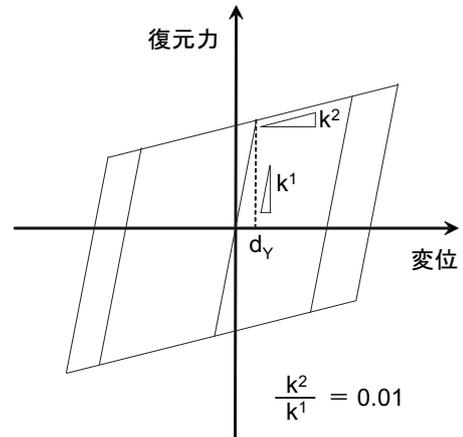


図-5 バネの剛性.

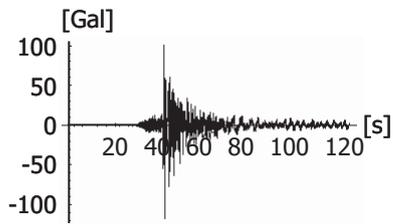
(2) 加速度計の配置

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使った数値実験を行う．

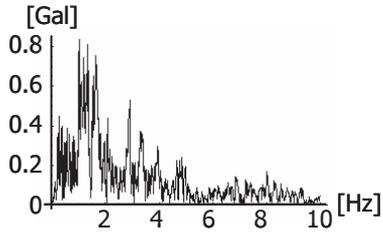
数値実験では，前章で説明した実構造物において 2008 年岩手・宮城内陸地震で観測された地震動を入力する．地盤と 1 番目の質点の間のバネに約 50% の塑性率となる塑性変形が発生するように，地震動の振幅を調整する．図-6 に 2008 年岩手・宮城内陸地震の場合の入力地震動を示す．

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．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-7 にプロットする．復元力特性の計測方法に基づいて，加速度と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-8 に示す．

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 番目のバネの加速度に対し，数値実験から直接得られた相対変位と，加速度の時間積分から計算された相対変位を，それぞれ，図-9 と図-10 にプロットする．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，どちらの図か



(a) 時刻歴データ



(b) フーリエ振幅

図-6 入力地震動（2008年岩手・宮城内陸地震）.

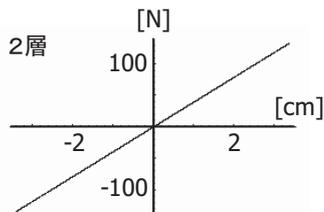
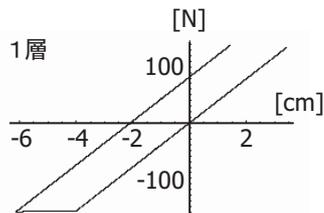


図-7 真の復元力特性.

らはその判定は難しい.

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-11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-12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.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

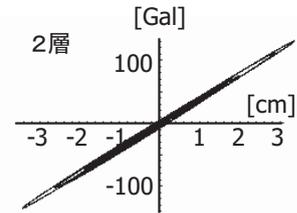
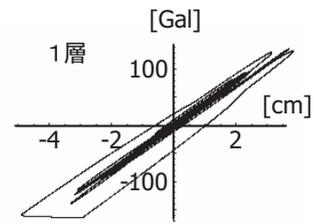


図-8 計測された復元力特性.

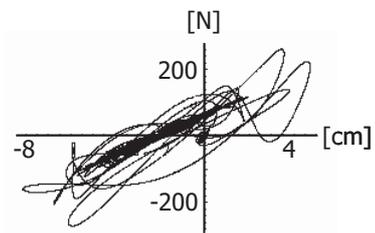


図-9 2質点系モデルを1質点系モデルとみなした時の真の復元力特性.

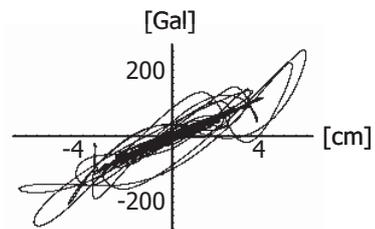
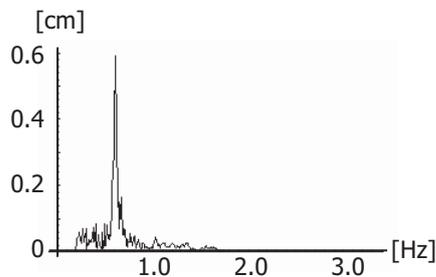
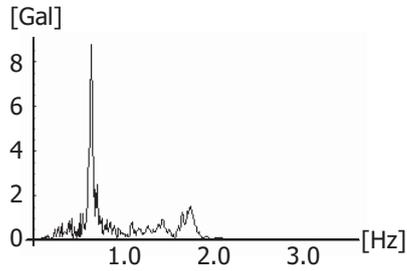


図-10 2質点系モデルを1質点系モデルとみなした時の計測された復元力特性.

除き1次モードを抽出した復元力特性を図-13に示す.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-14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.

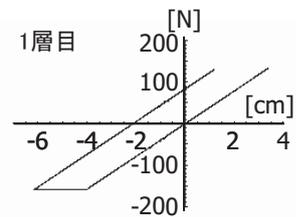


相対変位のフーリエスペクトル

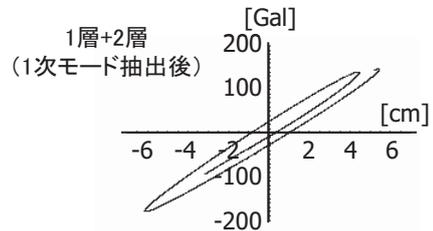


復元力のフーリエスペクトル

図-11 加速度と相対変位のフーリエスペクトル。



真の復元力特性



計測された復元力特性

図-14 塑性化した時刻付近の復元力特性。

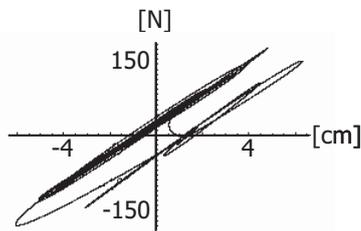


図-12 1次モードから得られる真の復元力特性。

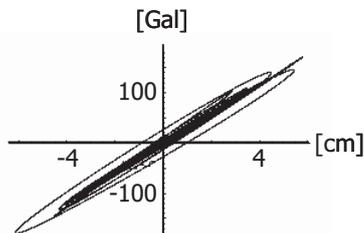


図-13 1次モードを使って計測された復元力特性。

5. おわりに

本研究では、地震被害の応急判定を目的とした、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。

- 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。
- 実構造物のデータを使って実際に復元力特性が計測できることを示した。復元力特性の計測精度は不明であるが、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。
- 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。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。

本研究は復元力特性の計測方法の提案である。実用化のためには、加速度計の選定や、計測精度の検証が必要である。応急判定が目的であるため、最高の計測精度は不要であるが、塑性化や損傷発生の可能性が確実に検知できる精度は必要である。

参考文献

- 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.
- 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
- 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
- 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