応用力学論文集 Vol.11, pp.929-936 (2008年8月) 土木学会

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

Development of a method of measuring restoring force characteristics of a structure using synchlonized accelometers

本多弘明*・堀宗朗**・鈴木崇伸***・古川洋之****
Hiroaki HONDA, Muneo HORI, Takanobu SUZUKI and Hiroyuki HURUKAWA

*学生員 修士(工学) 東京大学大学院博士課程, 工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
**会員 Ph.D 東京大学教授, 地震研究所(〒117-0031 東京都文京区弥生 1-1-1)
***会員 博士(工学) 東洋大学教授, 工学部環境建設学科(〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)
****(株)山武 アドバンストオートメーションカンパニー(〒251-8522 神奈川県藤沢市市川名 1-12-2)

This paper presents a method of measuring restoring force characteristic of a structure using synchronized accelometers to estimate degree of damage which is caused by an earthquake. The restoring force characteristic is obtained as relation between measured acceleration and displacement which is computed by integration of the measured acceleration. A set of acceleration data for an 11-storied building which has been monitored in 3 years are used. It is shown that the restoring force characteristic can be measured by the present method. Numerical experiments are carried out to examine the sampling rate and the data length that are needed to accurately measure the restoring force characteristics. It is shown that the minimum sampling rate and data length are 200[Hz] and 16[bit].

Key Words : *restoring force characteristic, time integration, earthquake damage*

1. はじめに

大地震が発生した際，各構造物に対し，被災状況を迅速に把握し，早期に対余震安全性を判断することは重要な課題となっている．現在，大地震時の被災状況の把握方法としては，専門家による目視や応急危険度判定士による応急危険度の判定[1)]が行われている．しかし，この方法では，診断結果が診断者の経験や主観に依存することになる．また，大地震による高域な被害が発生した場合を想定すると，全ての構造物の診断を人力で行うことは迅速性に欠けることは明らかである．代替案として，各構造物に計測システムを設置し，このシステムで計測されたデータに基づいて，定量的に構造物の損傷状況を把握する方法を構築することが考えられる．

本研究の目的は，地震による構造物の被害度を推定するために，計測データから復元力特性を計算することである．計測データは，時刻同期を取った複数の加速度計を使って計測される加速度の時系列データである．計測データの精度はサンプリング周波数とデータ長に依存する．この計測データを使って構造物や部材の復元力特性を計算する．復元力特性が非線形領域に達する場合，損傷の程度を判定することができる．この判定を被災状況の迅速な把握や早期の対余震安全性の判断に利用する．

本研究では，最も簡単な1自由度系のモデルを使って，構造物の上下端で計測された加速度とそれを積分して得られた変位から復元力特性を計算できることを説明する．3年間観測を行っている実構造物に対し，計測データを使って実際に復元力特性を計算する．またその時間変移を調べる．この結果から提案された復元力特性の計算が可能であることを議論する．計測データの精度を上げるにはサンプリング周波数とデータ長を大きくする必要があるが，計測の効率化にはこれを下げることが望ましい．適当な精度を確保する最低限のサンプリング周波数とデータ長を数値シミュレーションによって検討する．

2. 周波数域の積分方法と復元力特性の推定

建物の地震被害の度合いを定量的に測定する一つの方法として，復元力特性を利用することが考えられる．1自由度系モデルを例に復元力特性を説明すると，地盤の変位と質点の変位の差で与えられる相対変位と，質点にかかる力の関係が復元力特性である．構造物の応答が弾性域にあれば復元力特性は線形となるが，損傷によって塑性域に達すると復元力特性はヒステリシスループを描くようになり非線形となる．

震動台実験ではレーザ変位計やロードセルを使って変位と力を計測することができるが，実際の建物にこのような計測器を設置することは難しい．代替案として，時刻同期を取った加速度計を複数設置し，相対変位は時間積分によって，力は加速度から計算する方法が考えられる．1自由度系の相対変位を x，地動変位を

y，構造物の質量と剛性を m と k と置くと，1 自由度系の復元力 F は

$$F = kx \tag{1}$$

となる．最上階で計測される加速度 a は $a = \ddot{x} + \ddot{y}$ で与えられるが，運動方程式より

$$ma = -F \tag{2}$$

となる．以上，a と x は $-\frac{k}{m}$ の傾きを持つ直線となるが，これが復元力特性である．したがって，1 自由度系の加速度 a と地動変位の加速度 $\ddot{y}$ が計測されれば，$a - \ddot{y}$ の二階積分で与えられる相対変位 Δu と，加速度 a の関係が計測される復元力特性である．

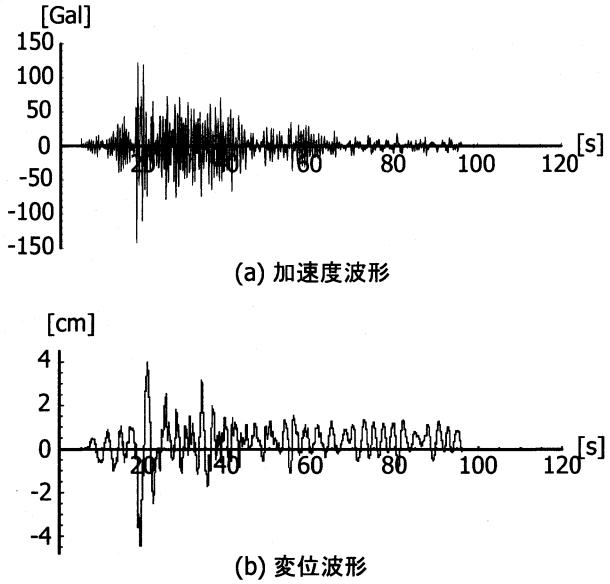
多自由度系に関しても，各層で加速度計測を行えば，同様な手法で復元力特性を得ることができる．しかし，多自由度系の場合，各質点の運動方程式は互いに連成するため，復元力の計算は複雑となる．連成した復元力特性の定式化や計算方法は現在検討中である．

計測された加速度を数値積分して変位を求める方法には様々なものが提案されている．典型的な方法として，線形加速度法により時刻域で積分した後で，多項式による補正を行う方法[2)]がある．また，オンサイトで変位出力を得るために，漸化式フィルタを用いた方法もある[3)]．このような方法は，リアルタイム性はあるものの，振幅や位相の精度には限界がある．この点を考慮して，本研究では，リアルタイム性はないものの，誤差の蓄積が抑制される周波数域での数値積分[4)]を用いた．

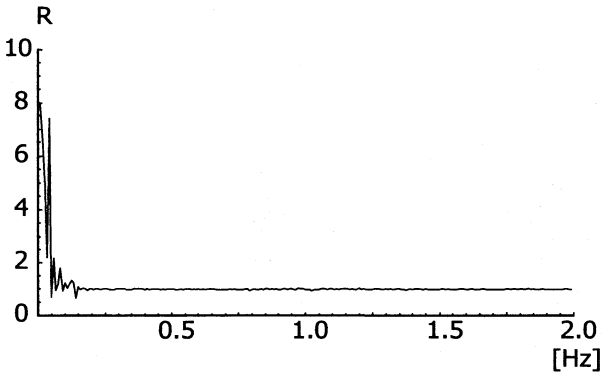
3. 震動台実験による積分精度の検証

加速度の時間積分精度を検証することを目的として，1 軸震動台を使った実験を行った．すなわち，震動台の動きを加速度計と変位計で計測し，加速度計の積分から得られる変位の時系列データと，変位計で計測された変位の時系列データを比較するものである．震動台にはサーボ型加速度計とレーザ変位計を設置する．サーボ型加速度計は次節以降で実計測に用いられているセンサと同型のものである．正弦波 (1[Hz]〜60[Hz]) と地震波を震動台に入力し，加速度の時間積分精度を検証する．一例として地震波を入力した際の波形を図 1 に示す．

周波数域積分の精度検証を行う．本論文では，図 1 のケースを示す．計測された加速度の時刻暦データをフーリエ変換し，その振幅を $A(\omega)$ とすると，この加速度を 2 回積分して計算される変位の時刻歴データのフーリエ振幅は $A(\omega)/\omega^2$ となる．計測された変位の時刻歴データのフーリエ振幅を $U(\omega)$ とし，二つのフーリエ振幅の比を計算する．すなわち，



図–1 計測された波形.

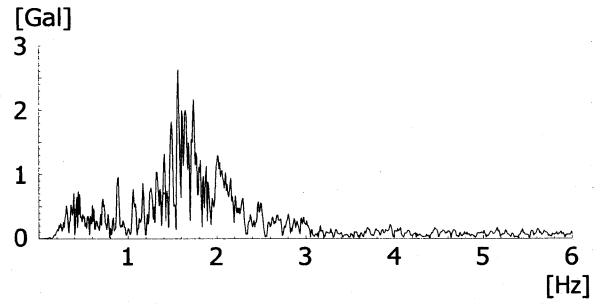


図–2 フーリエ振幅の比.

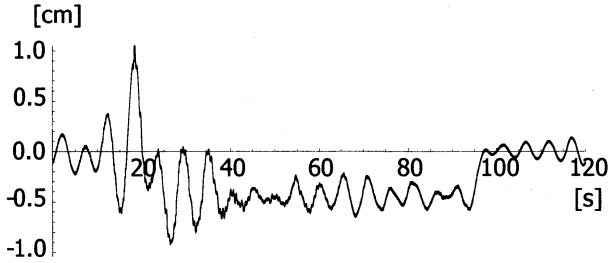
$$R(\omega) = \frac{A(\omega)}{U(\omega) \cdot \omega^2}. \tag{3}$$

振幅の比 R を図 2 に示す．この図から，低周波数成分の R が 1 よりずれていることが分かる．計測機器の特性の他，加速度のフーリエ振幅が ω^2 で割られるため，低周波数領域で加速度のフーリエ振幅の誤差が拡大することも原因である．

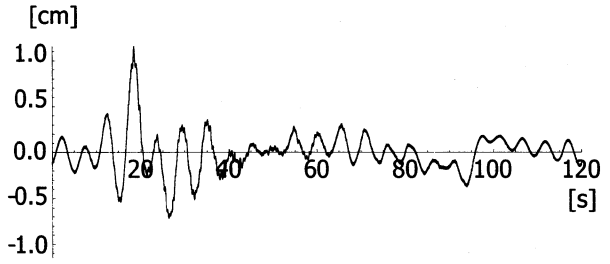
積分の結果生じる低周波数成分の誤差を除去するために，ローカットフィルタを適用する．フィルタの遮断周波数の値の設定が積分の精度を決定する．図 2 と図 3 から，遮断周波数を 0.2[Hz] とした．この遮断周波数を使ったローカットフィルタを使って積分を行い，レーザ変位計のデータとの差をとった時系列データを図 4 に示す．図 4 には 5 秒程度の周期を持つトレンドが見られる．加速度の低周波数成分はカットされているため，レーザ変位計で計測されたデータに含まれる



図–3 加速度のフーリエ振幅.



図–4 加速度の周波数領域積分で得られた変位の誤差.



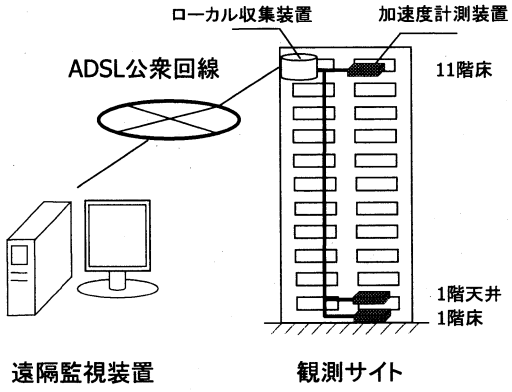
図–5 低周波数成分を除去したレーザ変位計の変位と，加速度の周波数領域積分で得られた変位の誤差.

誤差がこのトレンドの原因となっていると考えられる．そこで，図4の低周波数成分をカットしたデータを図5に示す．遮断周波数は0.2[Hz]である．この図から，本実験で用いられた加速度計の加速度データを周波数領域で積分して計算される変位の誤差はおよそ1[mm]程度であることが推定される．

4. 構造物の復元力特性の推定

4.1 計測の概要

11階建ての鉄筋コンクリート造集合住宅を計測対象とし，1階床・1階天井・11階床に設置した3軸加速度計により，地震波の計測が行われている[5]．図6にその概要を示す．3つの加速度計は有線で結ばれており，地震によってトリッガーがかかると，最悪でも±0.6[ms]の精度で時刻同期を取った加速度の時刻暦データを計測できる．記録メモリエリアにはリングメモリを採用し常時加速度データの記録を行い，トリッガーがかかると30[s]だけ遡って記録を残し，トータルで120[s]間の記録を行い次の記録エリアに移動させる．加速度計



図–6 計測システムの概要.

を搭載した計測システムは床と天井にボルトで固定されており，計測データはローカル収集装置からネットワークを経由して遠隔監視装置に転送させることができる．計測条件はサンプリング周波数2,000[Hz]，データ長24[bit]である．以下では，1階床と11階床で計測された加速度の時刻暦データを使って，この構造物の地震時の復元力特性を計算する．

4.2 復元力特性

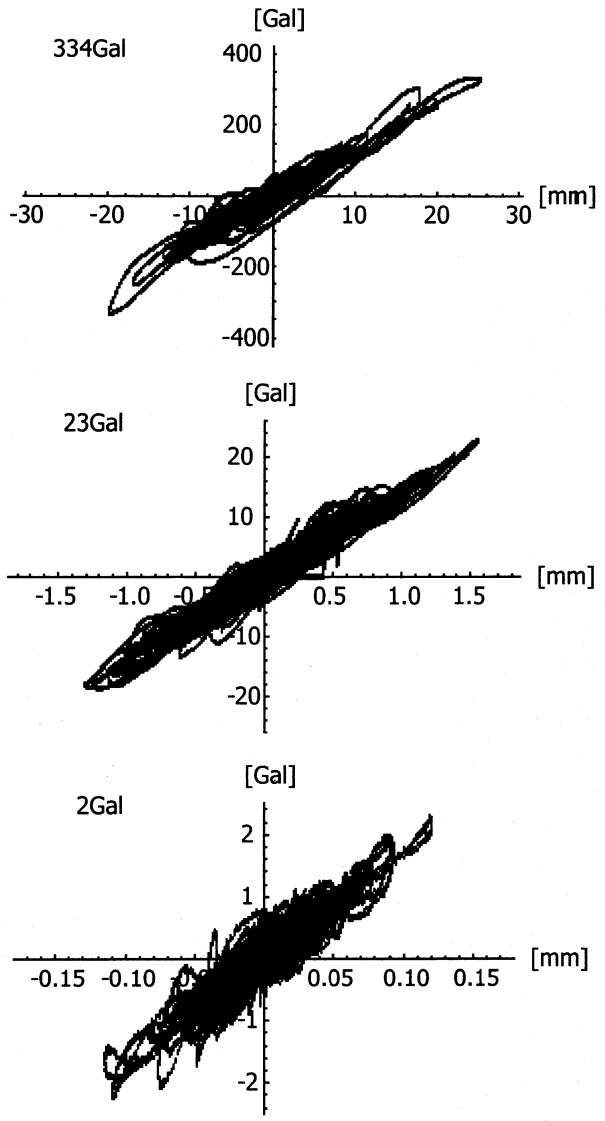
0.2[Hz]以下の低周波数成分をカットするローカットフィルタを用いて，加速度波形から変位波形を計算し，復元力特性を計算する．本研究で用いたデータは2005年8月～2007年12月の期間で計測されたものである．相対変位と加速度は次の式で与えられる．

$$(\Delta u_n,\, a_n) = (u_n^{11} - u_n^{1},\, a_n^{11}) \tag{4}$$

ここで上添え字の1と11はそれぞれ1階と11階で計測された加速度と計算された変位であることを示す．

一例として，大中小の3つの地震動が入力された場合に，計算された復元力特性を図7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[Gal]の場合である．最大加速度が334[Gal]の地震動は観測期間中最大の地震波である．この図から，応答加速度が数Gal～数百Galといった範囲の応答加速度が得られる地震波に対して，概ね直線の復元力特性が求められていることが分かる．また最大加速度334[Gal]のデータでは復元力特性に若干の非線形性が見られる．構造物の地震応答が弾性域から塑性域に達した可能性があったことが示唆される．

図7の復元力特性は，主震動方向のものである．すなわち，相対変位の絶対値が最大となる方向を見つけ，EW成分とNS成分をこの方向に座標変換して復元力特性を計算している．地震動が大きい場合，EW成分とNS成分にも図7と同様に明瞭な線形の復元力特性が計算されている．しかし，地震動が小さい場合，EW



図–7 計測データから求まる復元力特性の例.

成分や NS 成分を使って計算される復元力特性の線形性は，主震動方向の復元力特性に比べて明瞭ではない．

計測された復元力特性を定量的に分析することを試みる．概ね直線とみなせることから，各地震波における復元力特性の傾きを求めた．傾きの推定には最小二乗法を用いた．すなわち，計算された相対変位 Δu と計測された加速度 a の時系列データを $\{\Delta u_n, a_n\}$，傾きを k とすると，復元力特性は $a = k\,\Delta u$ となるため，傾き k の関数である次の誤差を最小化することで k を求めるのである．

$$E(k) = \sqrt[2]{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(a_n - k\,\Delta u_n)^2} \tag{5}$$

ここで N は計測データ数である．これから直ちに

$$k = \frac{\sum_{n=1}^{N} a_n\,\Delta u_n}{\sum_{n=1}^{N} \Delta u_n^2} \tag{6}$$

表–1 全地震動に対して求められた復元力特性の傾きと誤差・相対誤差.

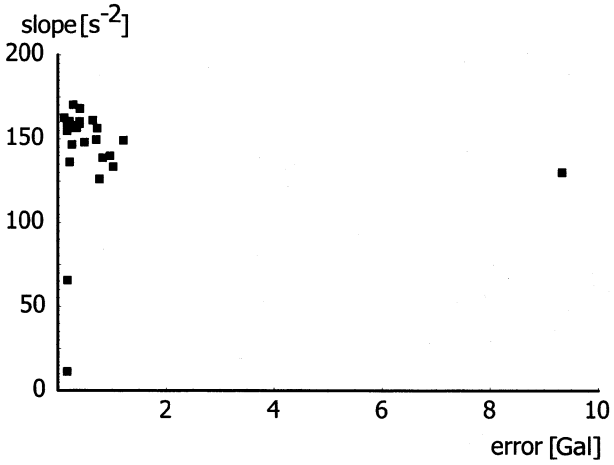
日付	応答加速度	傾き	相対誤差	誤差
2005/08/16	334.1	130.1	0.24	9.33
2005/10/19	29.2	133.3	0.20	1.03
2005/10/22	17.5	137.7	0.29	0.83
2005/11/01	11.0	141.8	0.21	0.26
2005/12/02	22.9	140.1	0.24	0.96
2005/12/05	15.7	147.8	0.18	0.49
2005/12/17	42.3	149.1	0.21	1.21
2006/01/18	16.7	152.2	0.29	0.71
2006/03/28	3.6	135.7	0.30	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

となる．またこの k を使うことで式 (5) の誤差 E の値が計算される．応答のオーダが異なるため，加速度の時刻暦データのノルム，$\sqrt[2]{\frac{1}{N}\sum a_n^2}$，を用いて誤差 E を除して，無次元化した相対誤差を使う．すなわち，

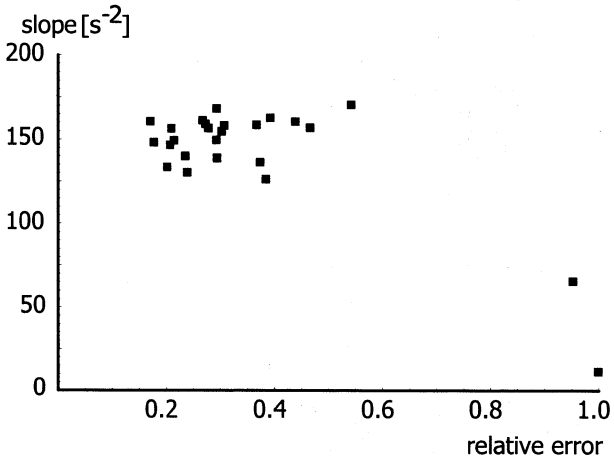
$$\Delta E_{rel} = \frac{E(k)}{\sqrt[2]{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} a_n^2}} \tag{7}$$

表 1 に各地震波の最大応答加速度と，式 (6) の k を使って計算された誤差 E と相対誤差 ΔE を示す．最大応答加速度と誤差の単位は $[Gal]$ である．また，図 8 と図 9 に，各々，横軸に誤差ないし相対誤差を取り，縦軸に傾き k の値をプロットした．k の値が 150 程度が真の値のように見られる．図 8 では，誤差と傾きにさほど明瞭な傾向は見られない．しかし，図 9 では，相対誤差が小さいと傾きが正解値に近いところに集まる傾向が見受けられる．したがって，計算された直線の復元力特性の信頼性を判断する指標として，誤差よりも相対誤差が適していることが分かる．また，相対誤差の値が 0.3 程度であれば，±10%の精度で復元力特性の傾きを計算できることが分かる．

計測された加速度の時刻暦データを周波数領域に変換し，振幅が最初のピークとなる周波数を 1 次モードの固有周波数を求めた．計測期間内のこの固有周波数の変化を図 10 に示す．図から固有周波数が変化してい



図–8 復元力特性の傾きと誤差の関係.

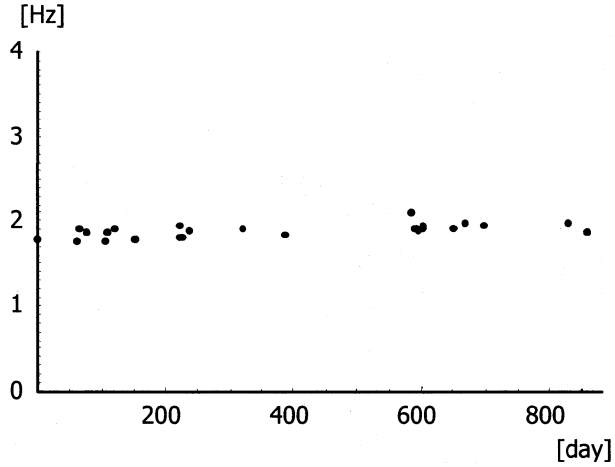


図–9 復元力特性の傾きと相対誤差の関係.

る傾向は見られない．鉄筋コンクリート構造物の固有振動数の経時変動に関しては既往研究があり[6]，気温変化が原因と想定される固有周波数の日変動幅は年間を通じて 0.02〜0.04[Hz] 程度であり，希に日変動幅が 0.06[Hz] を超える日も存在する．本研究で得られた固有周波数の変動はこの常時微動の日変動幅の数倍となっている．これは固有周期が微動ではなく入力地震波に引き起こされた応答から求められているためである．

4.3 考察

最大変位応答が 1[mm] 以下の地震動でも，直線性の強い復元力特性が計測された．前章で示したように，震動台実験では，加速度から計算される変位には 1[mm] 程度の誤差が含まれている．したがって，同種の加速度計を使い，応答が小さい実構造物の計測データから復元力特性が計測できたことには，疑問が生じる．勿論，図 7 に示された入力地震動が大きい場合の復元力特性には，(水平方向に) 数 [mm] 程度の幅が含まれており，この点は震動大実験の誤差と矛盾が無い．しかし，中小の地震から得られた復元力特性では，直線からのズレが 1[mm] を下回っているのである．



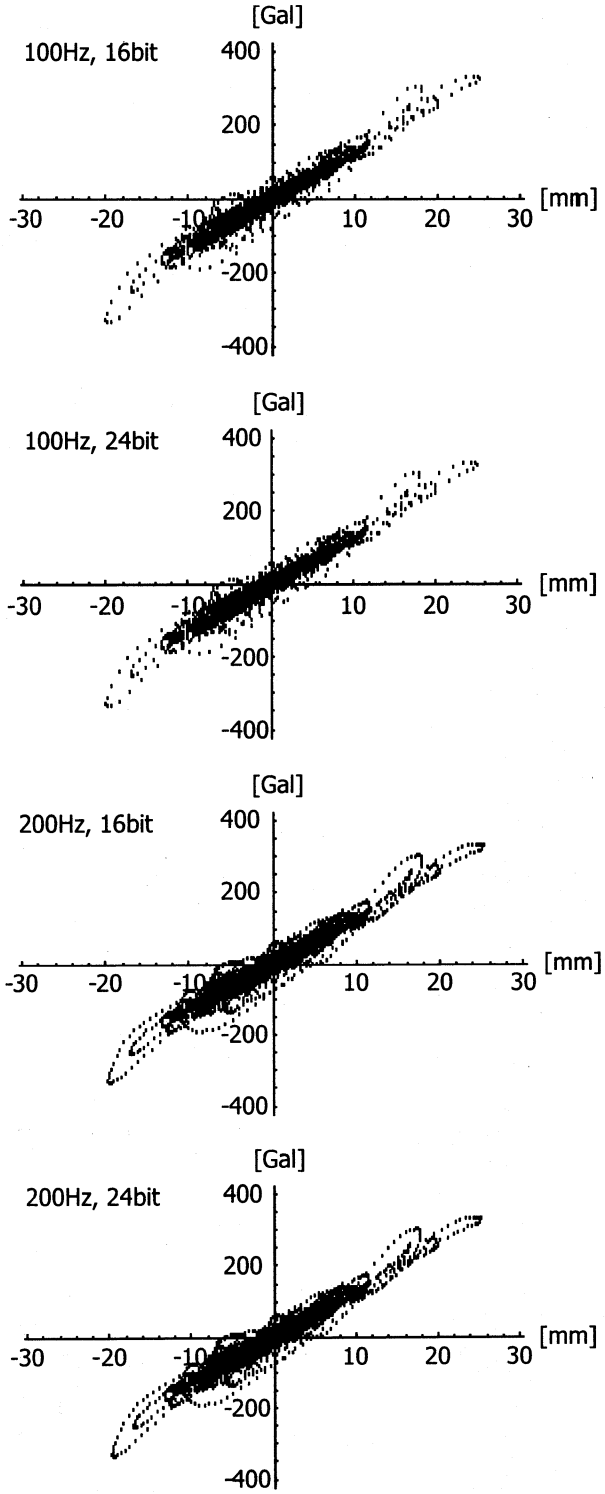
図–10 固有周波数の変動.

計測された復元力特性の直線からのズレが小さくなった理由として，まず，加速度そのものが小さいため，加速度の積分誤差が小さくなり，結果として変位の誤差が小さくなったことが考えられる．この他，計測された加速度と，それを 2 回積分して得られる変位では，両者の誤差に相応の相関があることも示唆される．すなわち，変位に誤差があっても，加速度にも傾き k 倍の誤差があれば，結果として直線からのズレは小さくなってしまうのである．誤差に相関が生じる原因は，ローカットフィルタを使った周波数域の積分である．さらなる検討が必要である．

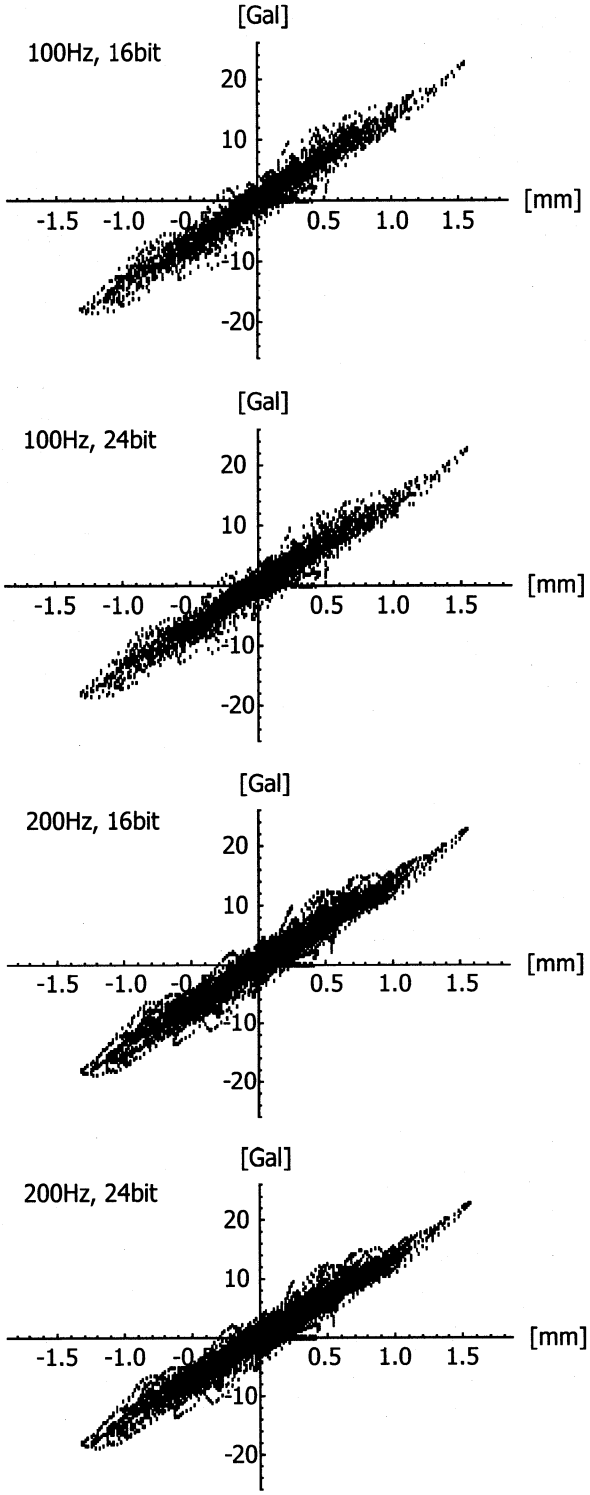
5. サンプリング周波数とビット数の影響の検討

前節で述べた実計測は，サンプリング周波数 2000[Hz] とビット数 24[bit] という，地震応答計測では極めて高い計測条件で行われている．衝突等に起因する高周波数成分の応答を計測する際にはこのような計測条件が必要である．しかし，通常の応答ではこの計測条件は過剰である．効率的な計測にはサンプリング周波数とデータ長を落とすことが必要である．復元力特性の計算の精度を確保しつつ，サンプリング周波数とデータ長を下げた計測条件を検討するため数値実験を行う．数値実験では，実計測データからサンプリング周波数とビット数を低下させた擬似データを生成し，この擬似データを使って復元力特性を計算し，元の復元力特性と比較する．この比較から最低限必要なサンプリング周波数とデータ長を見出すことができる．

一般に用いられているサンプリング周波数は 100〜200[Hz] であるため，数値実験で使う擬似データのサンプリング周波数は 100 と 200[Hz] とする．同様に，デー



図–**11** 復元力特性の例 1 (応答加速度 334[Gal]).

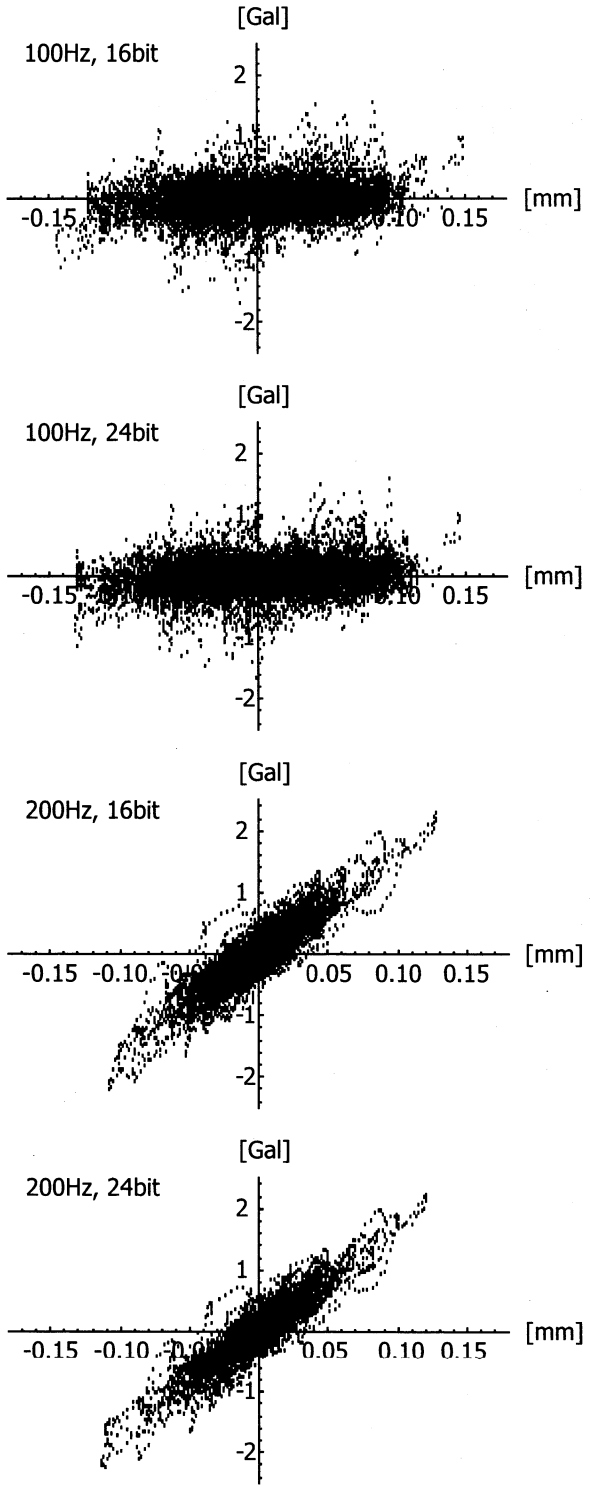


図–**12** 復元力特性の例 2 (応答加速度 23[Gal]).

タ長は 16 と 20[bit] とする．擬似データの生成方法は以下の通りである．

1. サンプリング周波数とビット数を減らした擬似データを作る．
2. ローカットフィルタを使って擬似データの加速度を積分し相対変位を計算する．
3. 擬似データの相対変位と加速度から復元力特性を作成する．

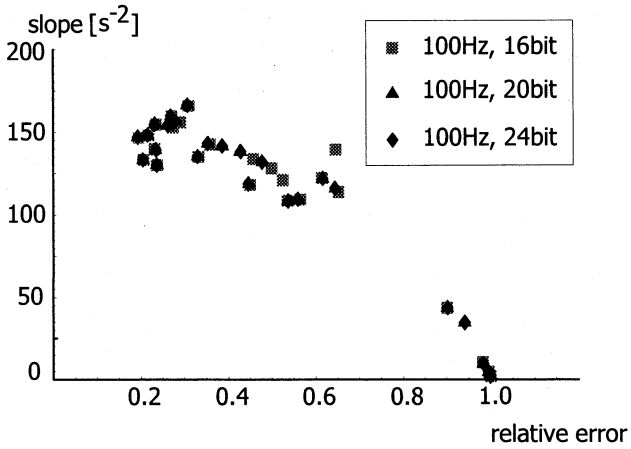
擬似データを使って得られた復元力特性を図 11〜図 13 に示す．各々の図で，サンプリング周波数 [Hz] とビット数 [bit] は，上から (100, 16), (100, 24), (200, 16), (200, 24) である．図 11 と図 13 の比較から，入力地震動が大きい場合にはさほどの差は無いが，入力地震動が小さい場合には計算される復元力特性はサンプ



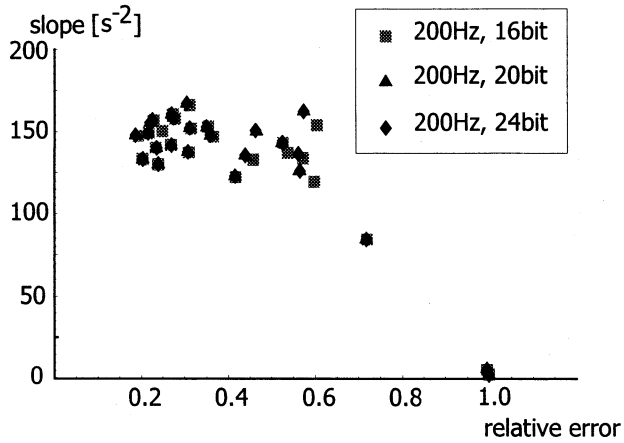
図–13 復元力特性の例 3 (応答加速度 2[Gal]).

リング周波数とデータ長に依存することが分かる．また，図 13 を見ると，データ長に比べ，サンプリング周波数が復元力特性の計算精度に影響を与えることが分かる．

次に，擬似データを使って求められた復元力特性の傾きを計算する．傾きの計算方法は前節と同様である．サンプリング周波数を 100 と 200[Hz] とした擬似データの復元力特性に対し，図 14 と図 15 において，前節で説明された相対誤差を横軸，計算された傾きを縦軸にプロットした．前節と同様，相対誤差が大きいと傾きが 0 になる．サンプリング周波数が 100 と 200[Hz] の場合を比較すると，相対誤差が 0.5 程度の値をとる地震動に対しては，100[Hz] の擬似データの復元力特性の傾きは 200[Hz] の傾きよりも値が顕著に小さくなっている．一方，同一のサンプリング周波数でビット数が異なる場合を比較すると，計算された復元力特性の傾きに顕著な違いは見られない．この結果からも，復元力特性の計測精度には，ビット数よりもサンプリング周波数が大きな影響を与えることが分かる．やや高めであるが 200[Hz] のサンプリング周波数が必要であり，データ長は 16[bit] で良いことが示唆される．



図–14 復元力特性の傾き (100[Hz]).



図–15 復元力特性の傾き (200[Hz]).

サンプリング周波数に比べて，データ長が復元力特性に及ぼす影響が小さい理由として，計測データに含まれる AD 変換に起因するランダムな誤差が周波数域の積分によって平均化されることが考えられる．すなわち，24[bit] から 16[bit] に分解能を低下させても，データ長の低下に伴う加速度誤差の増加は積分の過程で緩

和され，誤差の拡大をもたらさないと考えられるのである．したがって，復元力特性の計算精度を維持するには，データ長を長くしたままにするよりもサンプリング周波数を高いままにするほうが効果的である．

6. おわりに

大地震発生時における構造物の被害度を推定することを目的として，構造物に時刻同期を取った加速度計を複数台設置し，計測加速度を積分して変位を求め，得られた加速度・変位の関係から復元力特性を計算するという手法を提案した．加速度計の震動台実験の結果を基に，時間積分は周波数領域で行い，また，遮断周波数 0.2[Hz] のローカットフィルタを用いる．実構造物で観測された加速度データから直線性の強い復元力特性を求めることができた．3 年間の計測期間では，復元力特性の傾きはほぼ一定であり，構造物の 1 次モードの固有周期が一定値であることと整合している．また，広い範囲の応答に対して復元力特性を計算するためには，サンプリング周波数 200[Hz]，データ長 16[bit] が必要であることが数値実験によって示された．

7. 謝辞

本研究の一部は，財団法人日本科学協会の笹川科学研究助成によって実施したものです．ここに感謝の意を表します．

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) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994.
3) 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.
4) L.Huang, T.Peilius, M.Hori, H.Furukawa, T.Suzuki and A.Yamauchi : On Advantages of High Frequency Sampling of Time Integration and Time Synchronization, 土木学会地震工学論文集, 2007.
5) 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.
6) 金澤健司：コンクリート系構造物の固有振動数の日変動メカニズムの解明, 日本建築学会論文集, Vol.612, pp.63-71, 2007.

(2008 年 4 月 14 日 受付)