

## 2ヶ所のセンサにより得られた地震記録を用いた 建物全層応答推定手法の提案

岡田 敬一

(技術研究所)

### Overall Building Response Estimation Method on Records from Two Seismographs

Keiichi Okada

本論文は、建物内の入出力関係にある2点の地震計（加速度計）の記録から、建物全層の応答を推定する手法を提案している。この手法では次の手順により応答を推定する。まず、建物内の2地点の記録の周波数応答関数を求め、そのピークを固有振動数とみなす。ついで、頂部の相対応答記録にその振動数に対応した帯域通過フィルタを施し、各固有モードの応答波形に対応するものを得る。最後にこの応答波形に固有振動モード係数を掛け合わせ、振動モードを重ね合わせることで観測点以外の層における応答波形を求める。4種類の多自由度質点系モデルに188成分の地震動記録を入力した結果に対してこの手法を適用し、その結果から本手法の妥当性を確認している。

This paper propose a method to estimate overall building responses during an earthquake using acceleration records from two seismographs those have single input-output relationship. At first, natural frequencies are found through frequency response function of top and basement records. Then, to obtain each modal response of top layer, band-pass filter is applied. Frequency ranges for band-pass filters are determined by middle points of adjacent points. Each story response is assumed to present by sum-up of each modal response with considering modal coefficient of each layer. The author verified the systems by applying responses of four different multi-degrees of freedom systems applying 188 input motions were used.

#### 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、首都圏において大量の帰宅困難者が発生した教訓から、企業においては避難場所として社員へ安全な建物を提供し、さらに一般の人をも受け入れる体制を整備することが求められている。こうした背景の中、構造物の安全性を地震直後に評価し、判断することが重要であることが再認識されている。さらに、主構造部材の被害だけでなく、家具の転倒、2次部材・設備機器などの室内被害の推定も必要となってくる。このような状況を考えると、建物全層の応答加速度、速度や変位を推定する必要性は高い。

1995年の阪神淡路大震災以降、構造ヘルスマニタリング技術が注目され、研究が進み実用に供されつつある。建物に各種のセンサを設置し、地震などの後に建物の健全度、被災程度の評価を高度かつ迅速に行う目的での活用が進んでいる<sup>1)</sup>。ヘルスマニタリングを行う際の問題点としては、

どのようなセンサをいくつ、どの場所に設置するかが挙げられる。しかしながら、建物の全ての階（層）にセンサを設置することは困難であり、センサ個数は様々な制約条件から限定される。

文献2では層間変位を計測するセンサについて記述しているが、建物での地震応答を観測するためのセンサとしては地震計（加速度計）を設置することが多い。観測された入力加速度を構造設計時の応答解析モデルに入力するより建物応答に関する解析評価ができることから、加速度計による計測は有効である。そこで、本論文では、数の限られた加速度計を利用したモニタリングから、建物の全層応答を推定する方法を提案する<sup>3), 4), 5)</sup>。

センサ個数が限定されたモニタリングによる応答推定の手法としては、以下に示す複数の研究が報告されている。文献6では建物の最上階に取り付けた加速度センサ1台を用いて、振動モード形状の重ね合わせ応答を求めて構造物の最大層間変形角を求めている。また文献7では、3点以上の

センサを用いて、同様にモード形の刺激関数を同定し等価線形的手法によって応答推定を行っている。さらに文献8では、同定結果に基づいてベイズ更新を用いて設定設計モデルの刺激関数を修正し最適な応答推定を行っている。いずれの研究においても振動モード形もしくは層剛性を用いて応答推定を行うもので、文献7、8においては高次のモードまで考慮するためには、3点以上のセンサ情報が必要である。これらの手法ではセンサ個数を増やすことで、高次の応答まで考慮することができ推定精度が向上する。

本研究は、設計時のモーダル解析あるいは実験・実測から得られるモード形の情報を用いて、最下階（基礎）・最上階での2点のセンサ記録から建物全層での応答を推定することで、構造体の健全性を評価する推定手法を提案する。応答推定に用いるセンサは、建物入力と出力の関係をもつ2個である。本論文では、筆者らがこれまでに報告した文献3から文献6に示した手法を、応答解析モデルによる応答波形に適用し精度を示す。その入力波については、防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)で記録された東北地方太平洋沖地震の観測波形を用いる。推定に用いる振動モード形は、解析モデルで計算される刺激関数について最上層を基準としたものを用いた。さらに、実建物で観測された東北地方太平洋沖地震の波形について実験モード係数（過去の地震観測記録から求めたものを利用）を用いて応答を推定した結果を報告する。

## 2. 応答推定手法

### 2.1 線形応答解析

本論文で提案する手法はモーダル解析に基づいている。多自由度系の絶対応答は、モードに分解された各1自由度系の相対応答波形に各層の刺激関数をかけあわせ、各層毎に応答波形を重ね合わせることで相対波形を求め、さらに基礎入力を足し合わせることで求めることができる。これを周波数領域の伝達特性として表すと、モデルパラメータを用いて(1)式で表される。

$$H(f) = 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\beta u_j f^2}{-f^2 + 2ih_j f_j f + f_j^2} \quad (1)$$

ここで、 $f$ は振動数、 $n$ は最高次のモード次数、 $j$ は各モード、 $h_j$ 、 $\beta u_j$ 、 $f_j$ は、それぞれ $j$ 次の減衰定数、刺激係数、固有振動数である。また $i$ は虚数単

位を表している。この式の第1項は基礎における入力を表しており、これを除いたものが各次の相対応答関数の重ね合せである。図-1に3層モデルでの基礎入力に対する各層でのモードに分解された伝達関数および応答波形を示す。同図に示す応答波形には、後述する各モードの固有振動数を含む帯域を通過したフィルタ波形(図: estimate)も示してある。本論文では、モード次数毎に帯域通過するフィルタ波形を求めて応答推定を行う。

### 2.2 応答推定手法

本論文では、図-2に示すような地震計配置、つまり基礎(1階)および最上層(R階)に設置した加速度計の記録から建物の中間層の応答を推定する。なお、本論文では層を階と結び付けて表現する。つまり、本論文中の第1層は、2階に相当し、1階は基礎として示す。前節で示した振動モデルでの線形応答解析のように応答からモデルパラメータを推定するには、振動系のモード係数(刺激関数)、固有振動数および減衰定数の同定が必要である。一般にはシステム同定手法によってモデルパラメータを求めており、時系列応答推定ではARXモデル<sup>9)</sup>によるものや、周波数応答の伝達関数によるモード解析<sup>10)</sup>のカーブフィットによってモデルパラメータを推定している。

しかしながら、本手法では、振動モデルの同定は行わず、固有振動数の検出のみを行う。また、応答推定に必要なパラメータとしては、前節で示すモードの刺激関数に相当する係数として、最上層を基準としたモード係数(以下:基準化モード係数)を用いる。このため提案する応答推定手法では、建物形状がほぼ整形であり、ねじれなどの振動モードによる影響が小さく、せん断型応答をすることを想定している。

建物の基礎・最上層での2点のセンサ記録から求めた相対加速度応答から、検出した固有振動数を中心としたバンドパス波形を求めて、その次数に対応する基準化モード係数をかけあわせ各層毎に波形の重ね合せを行う。図-3に提案する線形応答推定手法による応答計算の方法をイメージ図で示す。前節で示したモーダル解析手法では、基礎入力データを元に応答計算をしているが、本手法では最上層における応答波形を利用している点が違っている。

本論文において提案する応答推定手法の計算処理手順について以下に詳しく説明する。ここでは、理解が進むように3層建物をイメージした3質点系モデル(表-2)を利用して手順を説明する。モデルの

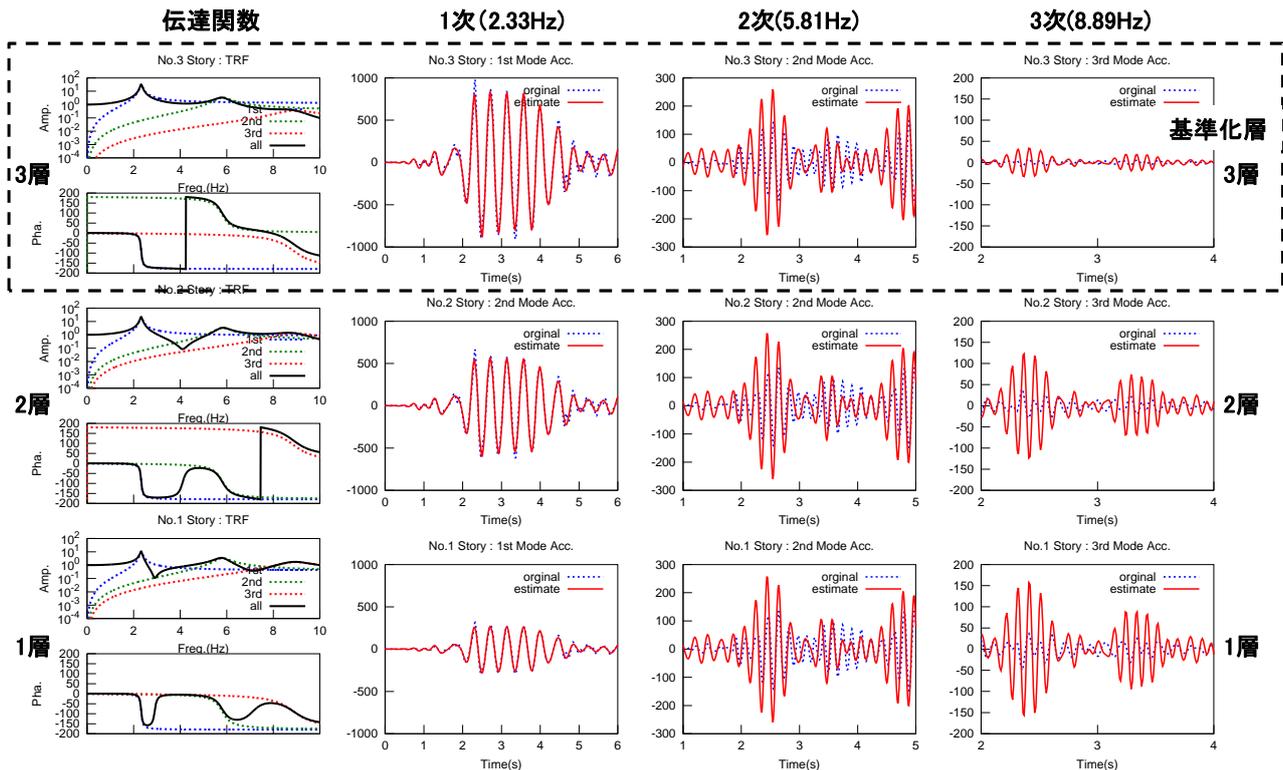


図-1 3層の振動モデルにおける伝達関数と相対応答加速度波形（1次から3次モード）

詳細は後述するが、このモデルの質量は集中型で全ての質点で1500t、剛性は最上層を基準に最下層において2倍となる台形分布を仮定している。

手順①： 図-2で示すように、基礎および最上層の波形記録により建物における固有振動特性を表す伝達関数  $H$  を求める。伝達関数は、観測記録を扱うことからノイズの影響などを抑えるため式(2)に示す平均化処理により求める。

$$H(f) = \sum_{i=1}^n \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (2)$$

ここで、 $G_{yx}$  は入力に対する出力の関係を示すクロススペクトル、 $G_{xx}$  は入力のパワースペクトルを示す。ここでの伝達関数は、複素数データとして求められている。

手順②： 手順①で求めた伝達関数についてハミングウィンド処理によりスペクトルの平滑化を行い、その伝達関数の虚部データが極値となる振動数を、低次から順に固有振動数とする。図-4には、手順①からの処理で求められる伝達関数と固有振動数を検出した例を示す。同図では3次モードまでの固有振動数が検出されている。

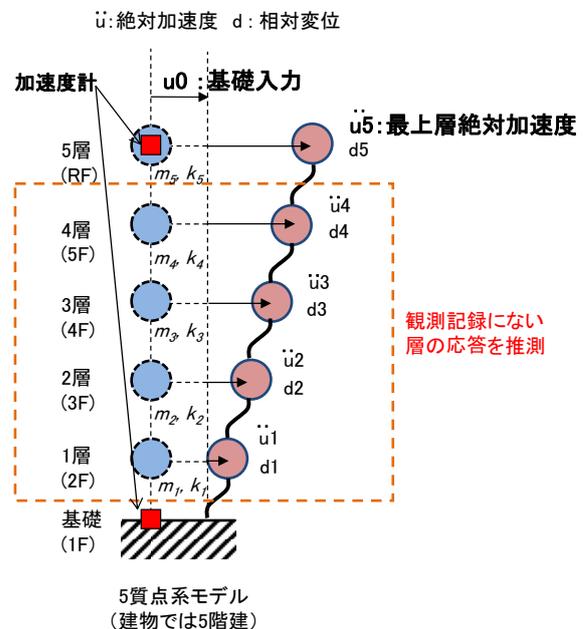


図-2 応答推定のための振動モデルの概念（5層の振動モデル例）

手順③： 基礎および最上層の絶対加速度波形記録からその差分を求め、最上層における相対加速度波形を得る。以降は、この相対加速度波形について信号処理を行う。

手順④： 手順③で求めた相対加速度波形について、手順②で求めた固有振動数を中心としたバンドパスフィルタ（以下:BPF）を施し、各振動モード次数の基準となる相対加速度波形を求める。図-5に各モード次数における BPF の振動数特性を示す。フィルタ特性は矩形窓として、周波数領域で処理を行う。本手法では、1次モードのローカット振動数点は 0.15Hz とし、ハイカット振動数は隣接モードの固有振動数との中間の値としている。2次モード以上については、各次数の固有振動数の中間振動数が遮断振動数である。また最上位次数におけるハイカット振動数は、その固有振動数の $\sqrt{2}$ 倍の振動数とする。

手順⑤： 手順④で求めた各次モードの相対波形について、図-6に示すような基準化モード係数を用い、各層の対応するモード次数の係数をかけあわせ、さらに層毎での波形を重ね合わせることで相対波形を求める。ここで用いた基準化モード係数は、最上階を1として基準している。

手順⑥： 手順⑤で求めた各層の相対波形について、

基礎の加速度波形を加算することで絶対応答波形を計算する。ここで基礎における加速度波形は、手順④で示す、対象とした固有振動数のモード次数までの振動数範囲を考慮することとする。つまり、0.15Hzから最上位次数の固有振動数 $f_n$ の $\sqrt{2}$ 倍の振動数までを対象とする。図-7にここまでの手順で処理され推定された各層の絶対加速度波形を解析モデルの応答波形と重ねて示す。両者はほぼ一致しており、提案手法の妥当性が確認出来る。

手順⑦： 手順⑥で求めた各層の絶対加速度応答波形を周波数領域で数値積分することで、速度、変位波形を求める。数値積分では、低振動数における積分誤差の影響があることから、積分時のローカット振動数を手順④で示した最低次のローカット振動数と同じ 0.15Hz として処理をする。

手順⑧： 手順⑦で求められた変位波形について、隣接層との差分をとることで層間変位を求める。

以上が処理手順であるが、推定結果である図-7を詳細に見ると、推定結果は真値と同じ位相であるが、やや振幅が異なり、その差は下層になるほど大きくなっていることが分かる。さらに、図-8に示した最大値での比較では、絶対加速度、速度、変位の順に応答推定の精度が向上していくことが分かる。変位応答を差分して求めた層間変位においては、最

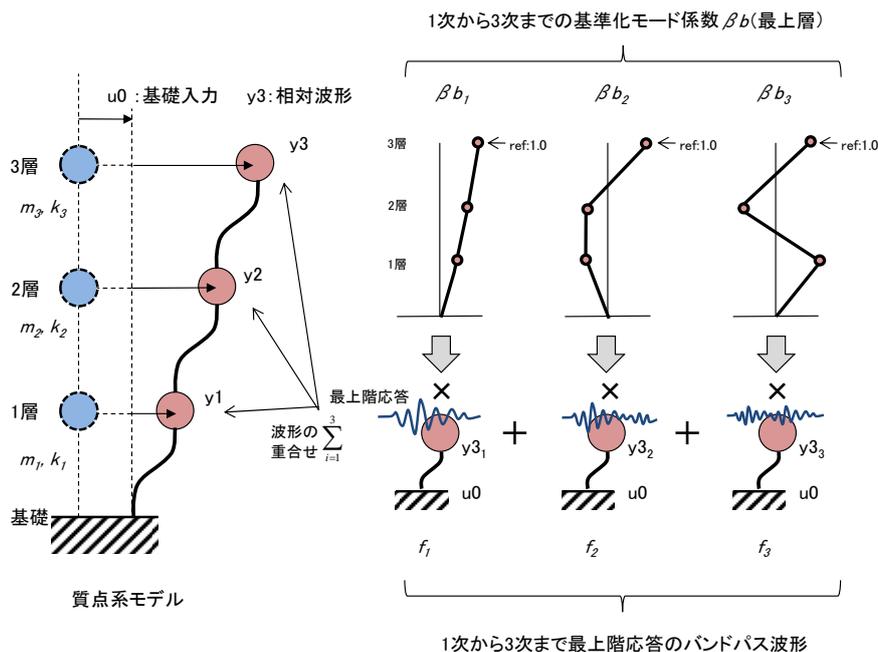


図-3 提案する簡易線形応答推定手法による応答計算

上層において誤差がやや大きい、その元となる変位応答の最大値分布では、両者はほぼ一致している。本提案手法は厳密なものではないので、誤差の特徴を理解しておくことは重要であろう。例題とした3層モデルの誤差の傾向を再度まとめると、変位応答に比べ加速度応答における推定精度が良くない。また、低層の方で誤差が大きいことが指摘できる。この原因は、最上階でバンドパス処理することで求めた高次モードの基準波が、真の振動モデルの各モードの応答波形と異なることが挙げられる。図-1に

示した伝達関数のように、本来の応答は各次のモードの応答を総て重ねあわせたものである。本手法では、各モード毎に周波数範囲を区分しており、この点が厳密なものとは異なる。高次モードほど、この影響を強く受けることは図-1に示した伝達関数からも明らかである。したがって、推定精度は構造物の振動特性に加えて、入力地震動の周波数特性にも左右されることになる。つまり、高次モードの応答が顕著になる場合では誤差が大きくなる可能性が高い。

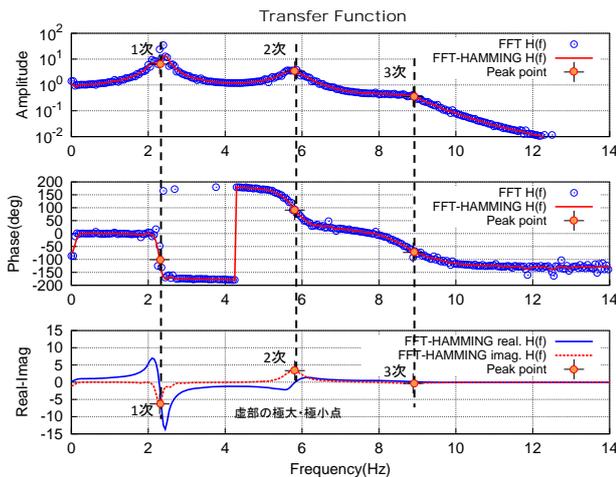


図-4 伝達関数とそのピークによる固有振動数の抽出（虚部データの極大・極小点で抽出）

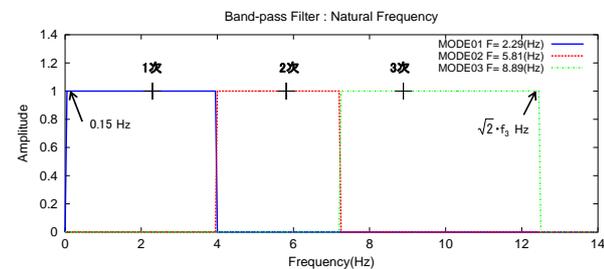


図-5 各モード次数におけるバンドパスフィルタ特性（1次から3次）

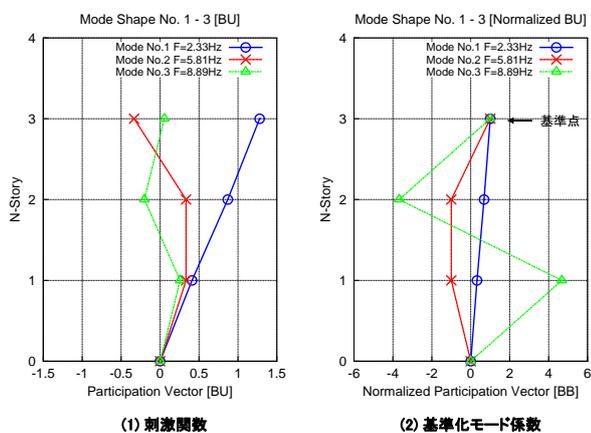


図-6 3層の解析モデルにおけるモード係数（刺激関数を基準化係数へ変換）

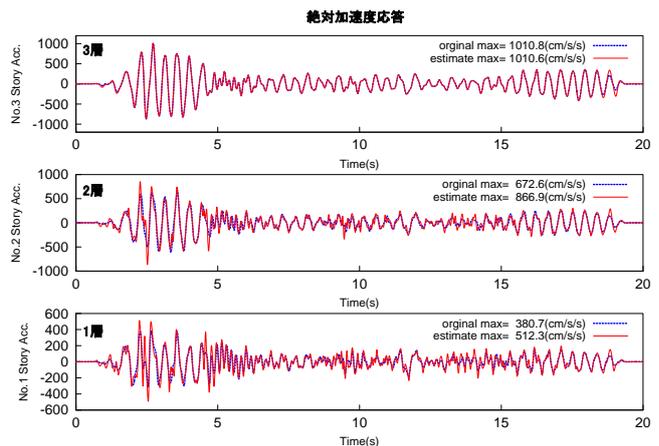


図-7 3層の解析モデルを利用した応答推定波形の比較（入力：エルセントロ NS 波 200cm/s<sup>2</sup>）

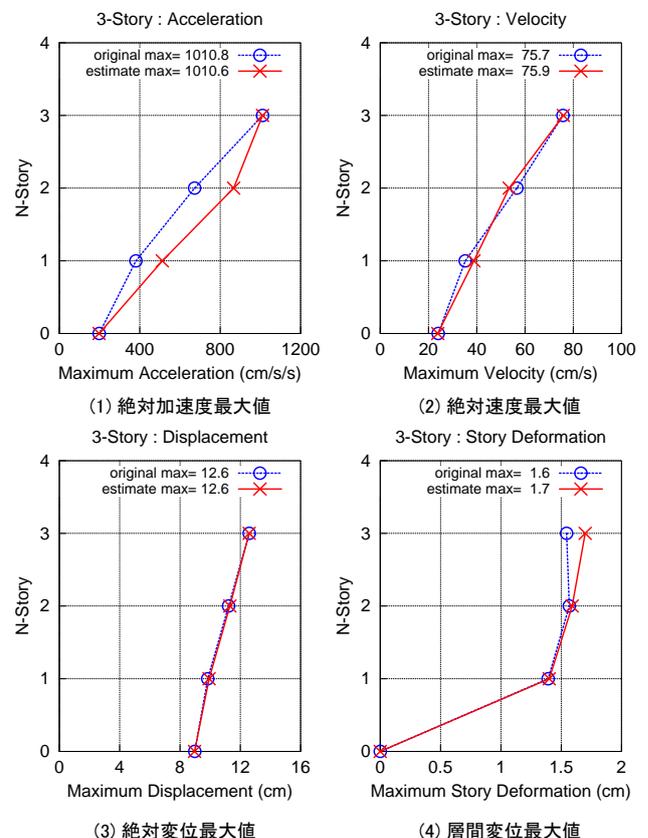


図-8 3層の解析モデルを利用した応答推定結果（最大値分布図）

### 3. 手法の精度検証

#### 3.1 検証地震波

解析モデルによる検討を多数行うことで本手法の応答推定精度を検証した。解析モデルへの入力波は、防災科学技術研究所の強震観測網(K-NET)で記録された2011年東北地方太平洋沖地震における加速度記録とする。対象とした地震波観測点の一覧を表-1に示す。観測点がある地域は、青森県から神奈川県までの太平洋沿岸に位置する9都県におよび、震源からの距離が近距離から遠距離までの記録を用いていることになる。観測点数は94点であり、水平動記録は2成分独立に扱い合計188成分の加速度を入力地震動とした。

これらの地震記録は、図-9に示すような特徴がある。最大加速度と最大速度の比で表される等価卓越固有振動数( $F_{eq}=PGA/PGV/2\pi$ )を見ると、0.5Hzから8Hzの範囲に広く分布している。そのうち約1.5Hz以下であるものが約半数の88波である。一方、次項節で応答推定精度を検証する解析モデル(表-2)での1次の固有振動数は0.41Hzから2.33Hzであり、各モデルへの入力地震動としては、卓越固有振動数が0.3Hz程度から8.0Hzまでの幅広い振動数成分を有していると考えている。

#### 3.2 解析モデル

表-2は、解析モデルの諸元一覧である。本研究では、建物の構造骨組を質点とばね、減衰要素からなるせん断型線形の高質点系モデルを用いた。解析モデルにおける質量分布 $m$ は全層一様とし、その剛性 $k$ の分布は最上層を1として最下層の剛性が2倍となる台形分布で均等に与えている。また減衰は、1次の減衰定数を2%とする剛性比例型とした。この建物モデルとしては、正方形の平面形状で2000 $m^2$ 程度の広さを持つ鉄骨造のオフィスを想定している。

図-10には、各モデルにおける各次の基準化モード係数を、高さ方向に層を基準化したもので示す。各モデルとも、質量、剛性分布とも同様に割り当てていることから、低層の3層解析モデルにおいての2次・3次のモード係数以外は、応答特性のモード形状はほぼ同じである。

#### 3.3 推定精度の検証

前節に示した4ケースの解析モデルについて、入力地震動188データを200 $cm/s^2$ に基準化して時刻歴応答解析を行い検証用の応答波形を作成した。この作成された時刻歴データの基礎と最上層の波形から、2.2節で示した処理手順を適用し、応答を推定した。

表-1 推定手法の誤差評価に用いる記録が得られたK-NET観測点  
(東北地方太平洋沖地震 03111446. NS/EW)

都県名	観測点名	記録点数	都県名	観測点名	記録点数
青森県	AOM	12	千葉県	CHB	13
岩手県	IWT	9	埼玉県	SIM	7
宮城県	MYG	12	東京都	TKY	13
福島県	FKS	10	神奈川県	KNG	5
茨城県	IBR	13	観測点数 (NS・EW記録数) 合計		94 (188)

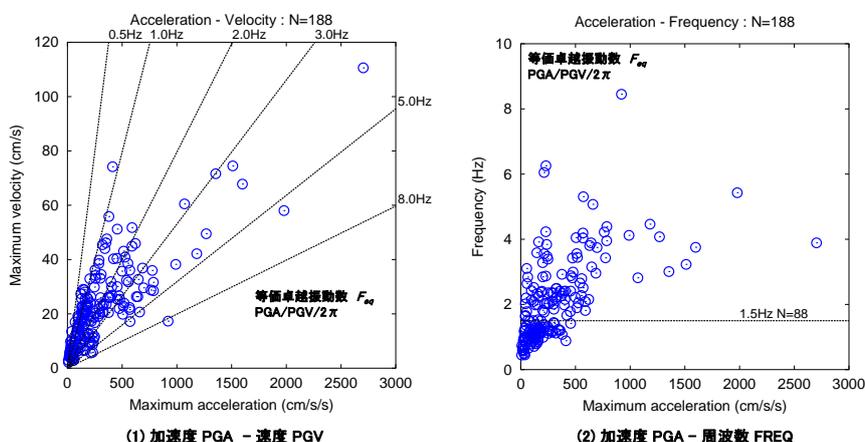


図-9 入力地震動の特性

図-11は、20層の解析モデルの応答波形の例を示す。図-12には、この20層の解析モデルのデータから応答推定を行った結果を波形で比較したものである。同図より地震波の前半部分（100秒から120秒）では、中間層では推定値と観測値とはあまり対応していない。また最下層における推定波形は、形状では良い対応が見られるが、振幅はやや大きくなっている。これらの区間においては、高次振動数の成分が多く含まれていることから、高次モードの影響が誤差として表れているものと考えられる。しかしながら、波形での後半部

では、1次モードが支配的であることから両者は非常に良い対応を示している。図-13は層の高さ方向での最大値分布図である。図から加速度応答、速度応答の推定結果は、理論計算値より大きくなっていることが分かる。一方、変位分布は、中間層部分において推定値がやや小さいものの、全般に誤差は小さい結果となった。層毎の変位波形の差分から求められた層間変形の結果では、中間層を節にした弓なりの応答分布を示し、下層での推定結果は理論値計算値よりも小さく、逆に上層側では大きく推定されている。

表-2 解析モデルの諸元

条件 / モデル	3層	5層	10層	20層
質量 $m$ 一様分布	全層 1500 (t)		質量分布 N層 (最上層) $m$ N-1層 $m$ N-2層 $m$ ⋮ 2層 $m$ 1層 (最下層) $m$ 基礎	剛性分布 $k$ ⋮ $2^*k$
剛性 $k$ 台形分布 最下層2倍	最上層 1.0E+6 (kN/m)  最下層 2.0E+6 (kN/m)			
1次固有振動数 (減衰定数)	2.33Hz (2.00%)	1.50Hz (2.00%)	0.79Hz (2.00%)	0.41Hz (2.00%)
2次固有振動数 (減衰定数)	5.81Hz (5.00%)	4.01Hz (5.34%)	2.20Hz (5.54%)	1.14Hz (5.61%)
3次固有振動数 (減衰定数)	8.89Hz (7.64%)	6.26Hz (8.33%)	3.58Hz (9.03%)	1.88Hz (9.25%)

注) 減衰定数は1次を2%とする剛性比例型

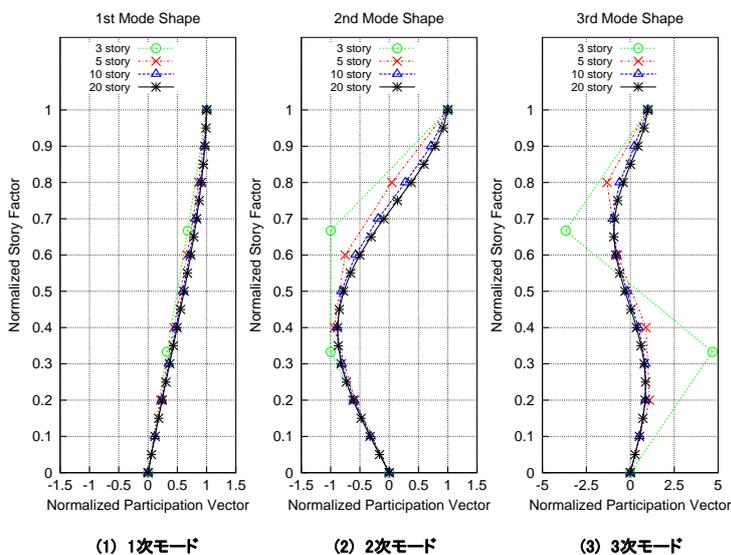


図-10 解析モデルの基準化モード係数 (1次から3次)

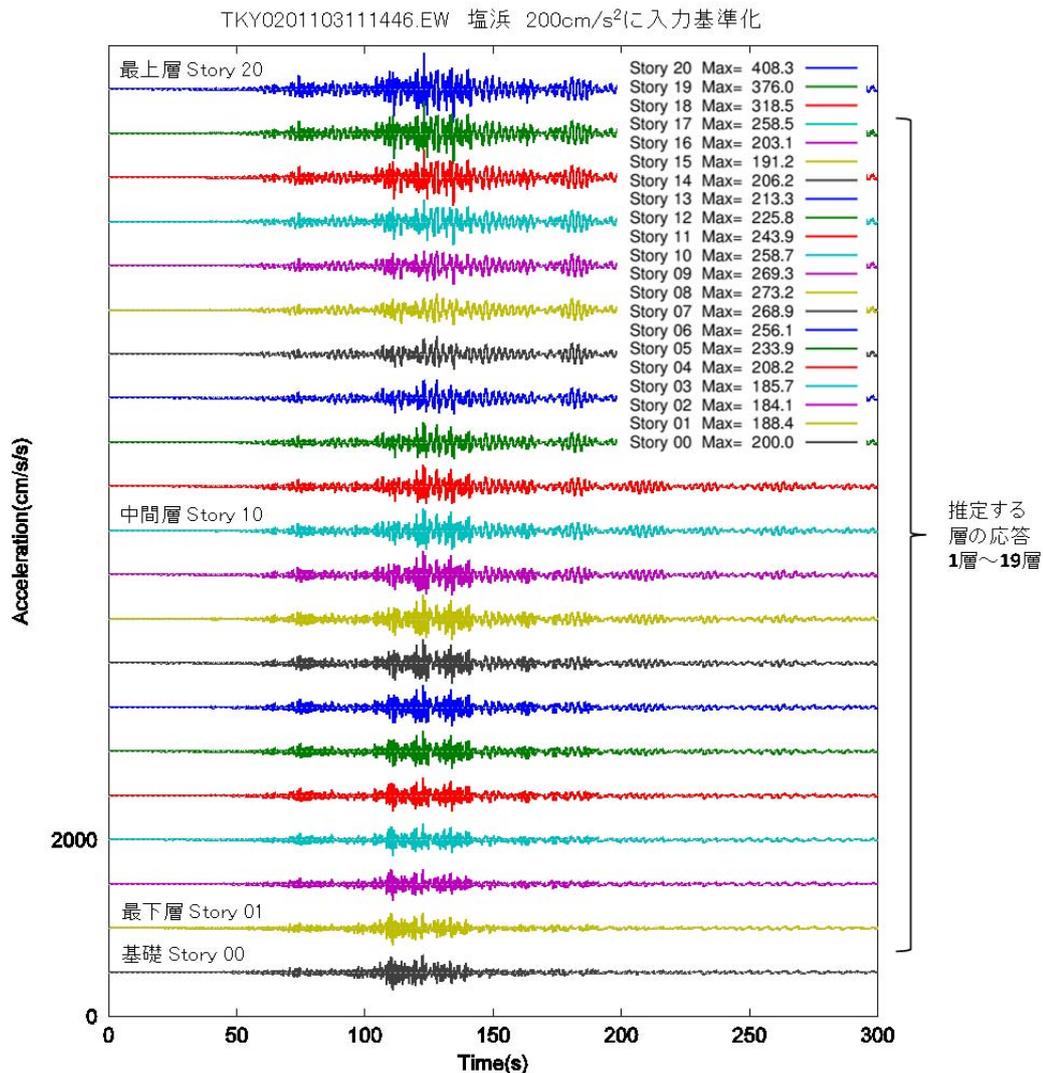


図-11 20層の解析モデルによる応答検証波形（東北地方太平洋沖地震 K-NET:塩浜）

これらの結果は一例であり、入力地震の特性の違いにより、応答推定の精度も変わってくると考えられる。本研究では応答最大値が構造ヘルスマニタリングに重要と考え、推定精度を最大応答値で評価することとした。以下には、推定誤差の最小、最大、平均および標準偏差などの統計処理結果を示す。

推定誤差 Error を式(3)のように定義する。

$$Error = \frac{|Xe_{max}| - |Xt_{max}|}{|Xt_{max}|} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

ここで、 $|Xt_{max}|$  は解析モデルの応答波形の最大値の絶対値、 $|Xe_{max}|$  は推定された波形の最大値の絶対値である。

図-14に3層モデルにおける188記録に対する推定誤差の分布を箱ひげ図で示す。同図では、横軸を高さ方向の層位置で表し、縦軸に推定誤差を示す。図中には、最小値、第1四分位点(25%データ点 Q1:箱底辺)、中央値(50%データ点 Q2:箱中線)、第3四分位点(75%データ点 Q3:箱上辺)と最大値が表現されており、細長い箱(50%データ範囲)と両側に出たひげ(箱長さ Q3-Q1の1.5倍点)でデータ分布が表現される。また、これらの範囲から外れた点を外れ値(異常値)として、点(ドット)でグラフに示す。最大加速度分布では、最大の推定誤差は112%(2層)となり、2倍以上の応答として推定されたことになる。誤差はプラス側に多くあり過大に推定される場合が多い。層毎に誤差の中央値(Q2)を比較するとそのうちの最大値は1層で見られ、その値は21.4%であった。また、その第3四分位点(Q3)は43.1%で

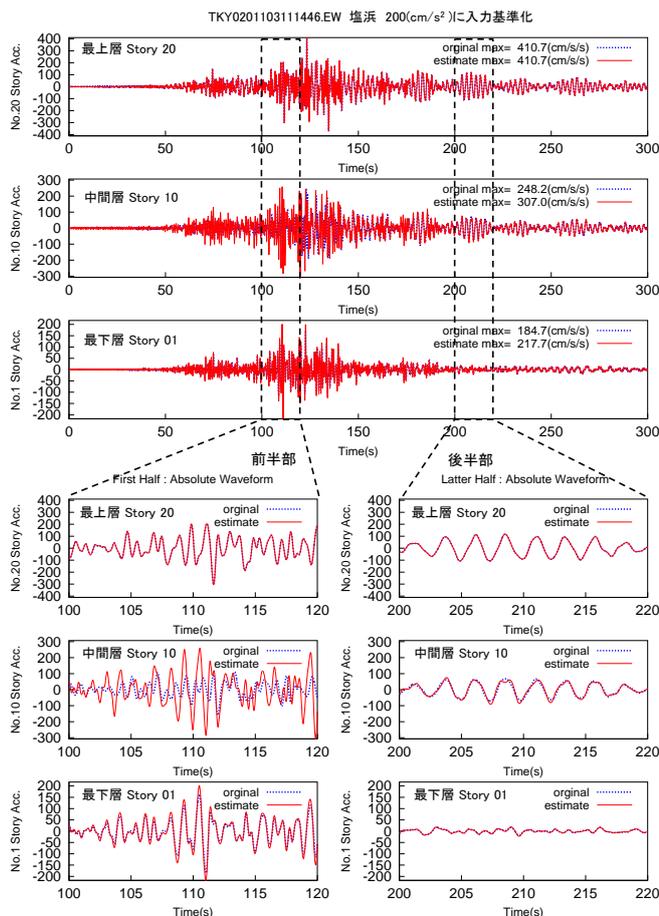


図-12 20層の解析モデルによる応答推定結果  
(東北地方太平洋沖地震 K-NET:塩浜)

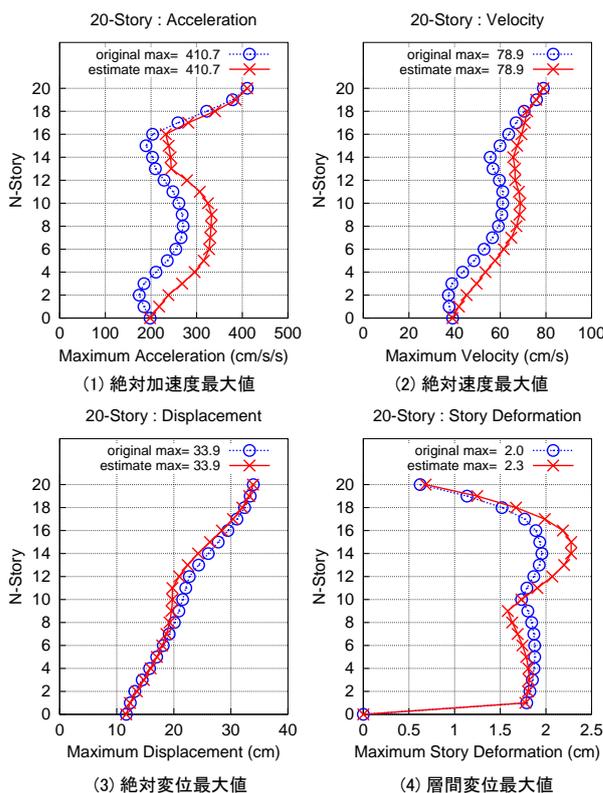


図-13 20層の解析モデルによる応答推定の  
最大値分布図による結果  
(東北地方太平洋沖地震 K-NET:塩浜)

ある。以降の記述は、絶対加速度は加速度、絶対速度は速度、絶対変位は変位とする。結果は、加速度よりは速度、変位の順に推定誤差が小さくなっており、変位応答では中央値(Q2)の最大値は-0.1%、第3四分位点(Q3)は0.4%であり、誤差は非常に小さくなっている。一方層間変位においては、誤差は小さいものの変位ほどではなく中央値(Q2)の最大は第3層で生じ5.5%となった。また、全体的に箱ひげの範囲外にある異常値(ドット)も多くみられ、誤差の中央値が最も小さかった変位であっても最大で26.3%となるケースもある

図-15から図-17は、5層から20層までの3ケースの誤差の分布である。これらの結果は先に示した3層モデルと同様に、加速度よりは速度、変位の順に推定誤差が小さくなる傾向にある。さらに、全般的に層数が増えるにつれ推定誤差の精度が悪くなる傾向にある。20層の解析モデルにおいては、加速度の推定誤差は最大で346%になる

例もある。層毎に誤差の傾向を見ると、加速度では上層において誤差が大きく、速度では層によらずほぼ一定値、変位においては下層において誤差が大きくなる。層間変位においては、中間層で誤差が小さく、中間層を中心に下層と最下層に向かって誤差が大きくなる傾向がみられる。

図-18から図-21は、3層から20層までの4ケースについて、全層にわたる誤差分布を箱ひげ図でプロットしている。同図下には、図データの統計値表も示す。図中で示す推定誤差は、絶対加速度、絶対速度、絶対変位、層間変位をそれぞれに示している。全体の傾向として、加速度よりは速度、変位の順に推定誤差が小さくなる傾向にあり、層数が増えるにつれ推定誤差の精度が悪くなる傾向にある。

層数が最も多い20層モデルでは、誤差の中央値(Q2)は加速度最大値で22.8%、速度では8.7%、変位においては0.6%となり、誤差は、加速度から

変位になるに従い小さくなっていく。この傾向は、どの解析モデルでも同じである。変位波形は加速度波形に比べて、高振動数成分の影響が小さいことからこのような誤差傾向になっていると考えら

れる。また、全般的に中央値と同様に、第3四分位点(Q3)においても、加速度から変位になるに従い小さくなっていく。

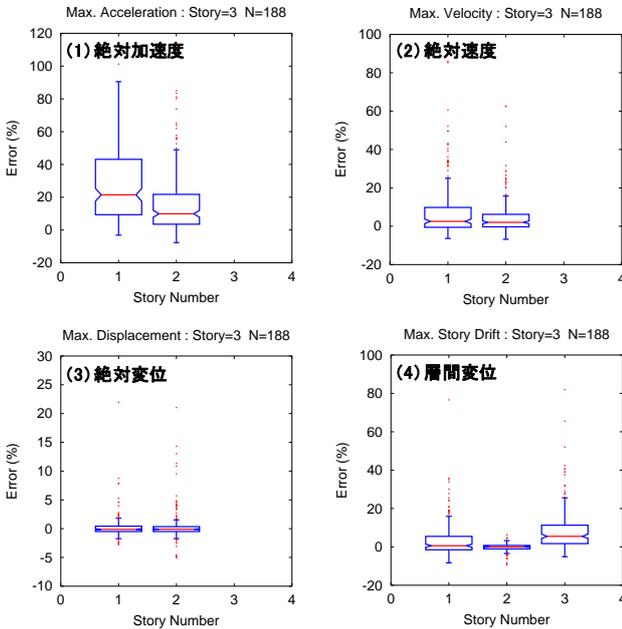


図-14 3層の解析モデルによる各層応答推定誤差 (箱ひげ図)

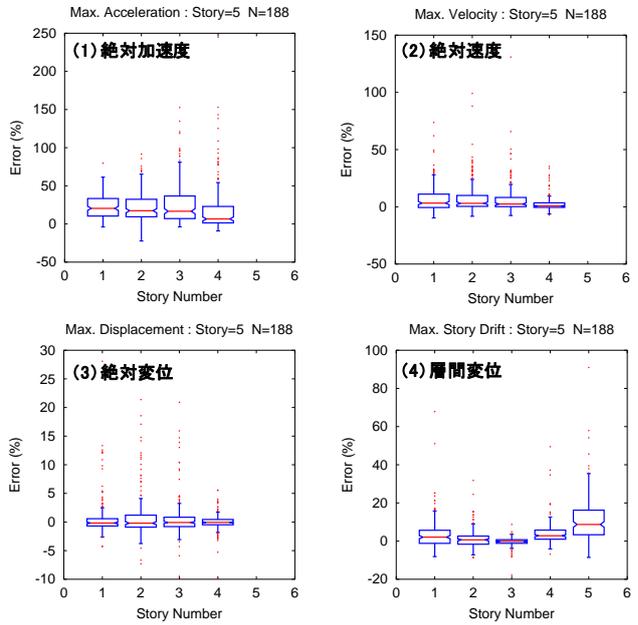


図-15 5層の解析モデルによる各層応答推定誤差 (箱ひげ図)

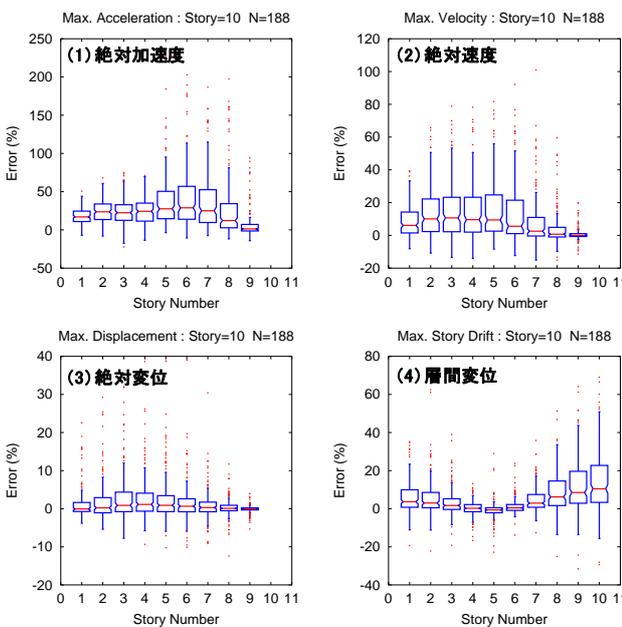


図-16 10層の解析モデルによる各層応答推定誤差 (箱ひげ図)

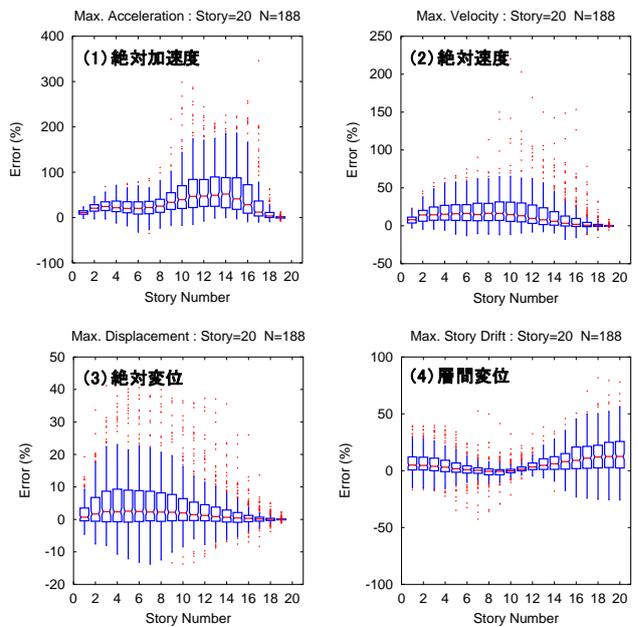
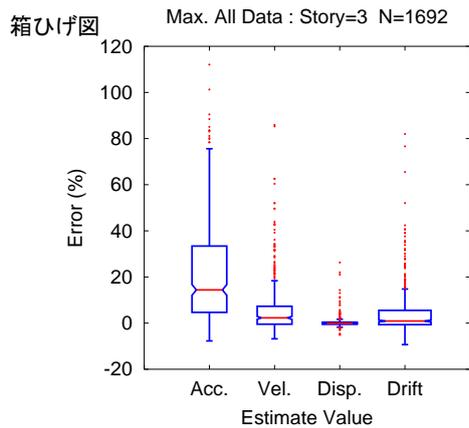


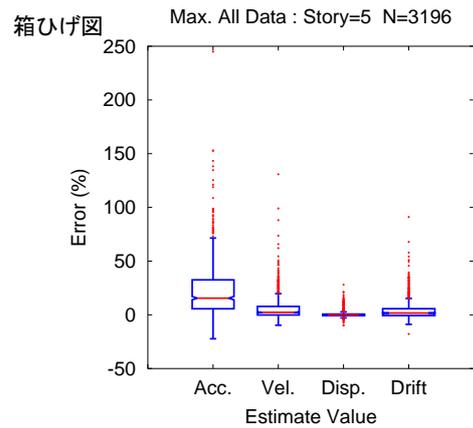
図-17 20層の解析モデルによる各層応答推定誤差 (箱ひげ図)



箱ひげ統計値

箱ひげ値 / 変数	加速度 Acc.	速度 Vel.	変位 Disp.	層間変位 Drift
最小値	-7.73	-6.82	-5.06	-9.33
第1四分位数	4.67	-0.46	-0.50	-0.65
中央値	14.39	2.28	-0.12	0.90
第3四分位数	33.39	7.31	0.40	5.52
最大値	112.04	85.91	26.29	81.96

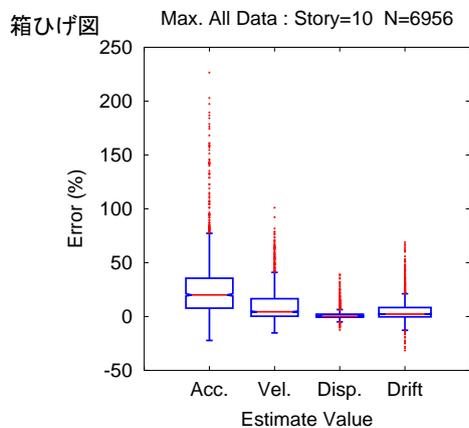
図-18 3層の解析モデルによる全層応答  
推定誤差



箱ひげ統計値

箱ひげ値 / 変数	加速度 Acc.	速度 Vel.	変位 Disp.	層間変位 Drift
最小値	-22.29	-9.66	-9.91	-17.86
第1四分位数	5.65	-0.13	-0.71	-0.68
中央値	15.52	2.31	-0.13	1.65
第3四分位数	32.56	7.84	0.69	5.70
最大値	244.99	130.89	28.09	91.00

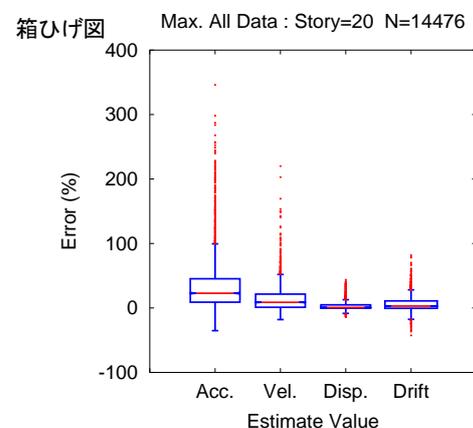
図-19 5層の解析モデルによる全層応答  
推定誤差



箱ひげ統計値

箱ひげ値 / 変数	加速度 Acc.	速度 Vel.	変位 Disp.	層間変位 Drift
最小値	-22.26	-15.25	-12.43	-31.54
第1四分位数	7.78	0.25	-0.68	-0.30
中央値	20.07	4.40	0.24	2.27
第3四分位数	35.59	16.55	2.15	8.35
最大値	226.50	101.05	39.03	68.98

図-20 10層の解析モデルによる全層応答  
推定誤差



箱ひげ統計値

箱ひげ値 / 変数	加速度 Acc.	速度 Vel.	変位 Disp.	層間変位 Drift
最小値	-35.17	-18.00	-13.81	-42.59
第1四分位数	8.93	1.01	-0.48	-0.57
中央値	22.84	8.71	0.64	2.96
第3四分位数	45.28	21.43	4.83	10.90
最大値	345.94	219.98	43.61	81.72

図-21 20層の解析モデルによる全層応答  
推定誤差

## 4. 実建物での応答推定

### 4.1 観測対象建物

対象建物は東京都江東区越中島にある研究所実験施設の鉄骨造建物（5階）である。本建物では、全層の応答が観測されていることから、モデルを介した計算をすることなく本手法の妥当性が検証可能である。ただし、実験施設であることから、一般建物とは違い変則的な階高を持った建物である点に注意が必要である。建物は正方の平面形状をしており、1階部分においては、柔部材と剛部材の混合配置により地震エネルギーを集中し応答低減する制震構法が採用されている。このため、各階には加速計（2方向：6台）および各階の層間変形が観測できるように変位計（2方向：5台）が設置されている。図-22に建物立面・平面図とセンサ配置を示す。

ここでは、1階基礎を入力点、最上層のRFLを出力点として2地点の観測地震記録から全層の応答推定を行った。

### 4. 建物振動モード係数

提案手法では基準化された振動モード係数が必要となる。3章では、解析モデルを用いて推定を行ったが本節では観測データから求めることとした。本建物において観測された12地震のデータについて、1次から3次まで水平2方向で固有振動数を同定し、頂部（RFL）を基準として各階の伝達関数を求め、固有振動数に対しての振動モード係数を求めた<sup>3)</sup>。

図示しないが周波数伝達関数の固有振動数はX、

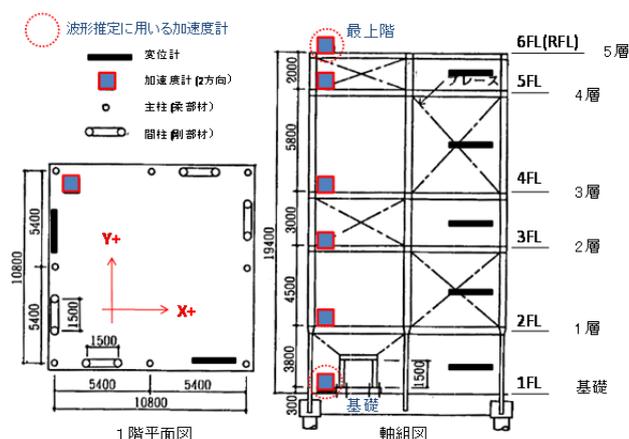


図-22 実建物での観測位置（5層モデル）

Yいずれの方向においても低次から順に、1.8Hz、4.7Hz、6.4Hzとなっている。この振動数に対応するモード形状を図-23に示すが、方向によらずほぼ同一の形状となっている。1次のモード形は、建物構造の特徴どおり1層の変形が大きくなっている。2次および3次のモード形は、両者とも4層付近を節とする形状でほぼ同様である。伝達関数では、2次のピークは明瞭であることから、2次の固有振動数は、4.7Hz付近とわかる。そうすると3次のモードは、鉛直方向の形状が2次モード形状となるねじれのモードであると考えられる。ただし、ねじれモード形状を見るためのセンサの配置での観測が行われていたため、その状態を確認できていない。

### 4.3 東北地方太平洋沖地震の本震記録

本節では、建物で観測された2011年東北地方太平洋沖地震の本震記録 ( $M_j 8.4$ ) について応答推定手法を適用し評価を行った。この地震時には建物最上層では  $400\text{cm/s}^2$  以上を観測した。

建物 X 方向について基礎(1FL)および最上層(RFL)の記録から伝達関数を求め、固有振動数のピークを検出した。求めた伝達関数を図-24に示す。検出された振動数は、1次が1.76Hz、2次が5.27Hz、3次が7.03Hzとなった。前節で推定された固有振動数と比べ、高次のモードではやや高い振動数側に検出されている。

図-25は、推定された各層の応答加速度および変位波形である。同図の波形は実記録の波形（破線）と推定結果（実線）を重ね描いており、80秒間から100秒の区間の結果をさらに拡大して示し

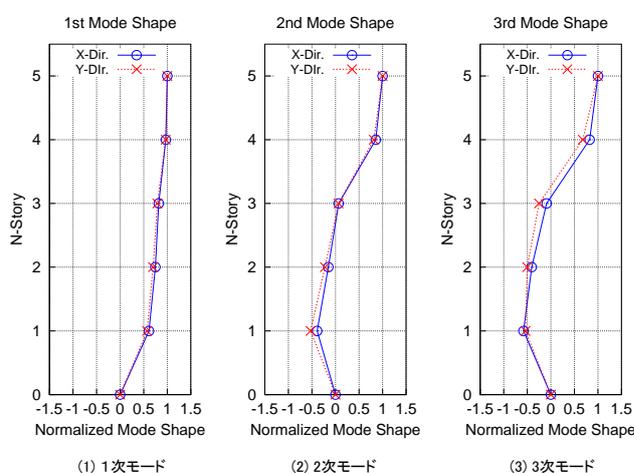


図-23 応答推定に用いた水平2方向の基準化モード係数（過去12地震より計算）

である。実記録と推定波形とは、ほぼ一致しており、波形の形状、位相、最大値ともに非常に良い推定ができています。図-25 からみかけの卓越周期は 0.5 秒程度と見てとれ、一次モードに対応している。つまり、応答波形はほぼ一次モードで構成されていると考えられ、そのために推定精度が高かったのであろう。

図-26 には、建物 X 方向における波形推定から求められた最大応答分布図を示す。同図には、加速度、速度、変位、層間変位を高さ方向の層応答として、実記録（実線）および推定（破線）を重ね描いている。図-27 には、建物 Y 方向での最大応答分布図を示す。各方向における最大推定誤差は、X 方向、Y 方向の順に加速度で 4.9%と 5.4%、速度で 0.9%と 1.0%、変位で 1.4%と 1.7%であった。また層間変位においては、最大点以外のところでの誤差が大きくみられるが、最大点における

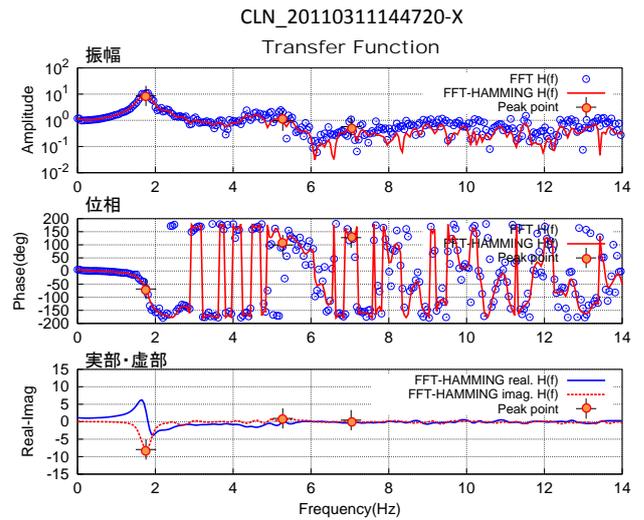
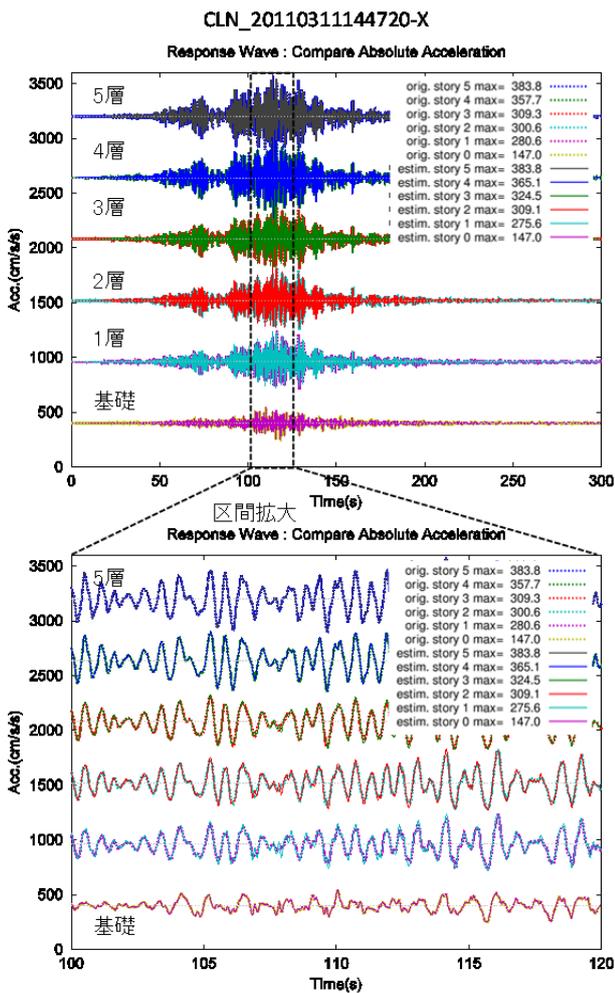
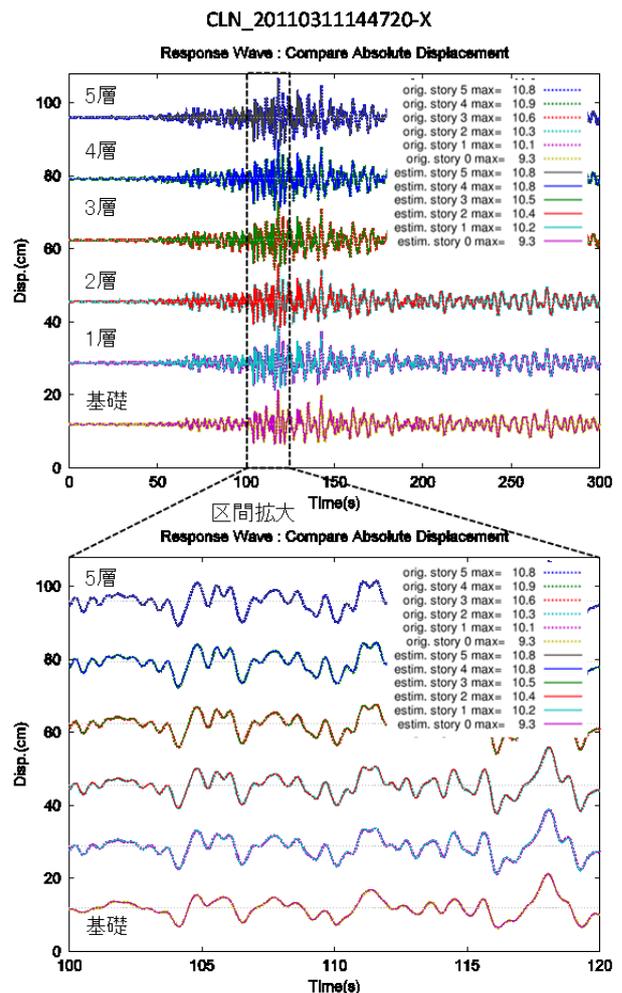


図-24 東北地方太平洋沖地震(本震)での建物 X 方向の伝達関数(固有振動数の抽出)



(1) 絶対加速度波形



(2) 絶対変位波形

図-25 東北地方太平洋沖地震(本震)での建物 X 方向の応答波形の推定結果(絶対加速度・変位)

誤差は、0.5%と7.1%である。これらの結果から最大値分布は、加速度・層間変位でややずれているが、速度、変位では、観測値とほぼ一致した結果となっている。

層間変位は最下層である第1層でもっとも大きく、X方向で2.1cm、Y方向で2.6cmを記録している。層の階高は3.8mであることから、その層間変形角は、X方向で1/180、Y方向で1/138となる。この層間変形角は1/200を超えており構造体は弱塑性域に入ったものと考えている。事実、地震後において設置された第1層の層間変位計の記録からは4mm程度の残留変形が観測されている。

本論文で提案している手法は線形応答を念頭において展開した。しかしながら、上述のように弱塑性域に入った構造物の応答でも推定できる可能性を示したと言えよう。

## 5. まとめ

地震計は構造ヘルスマニタリングに有効なセンサーであるが、建物の限られた階(層)にのみしか

設置されないことと考えられる。そこで、建物内の2ヶ所に設置されて加速度記録を用いて、設置階以外の層における応答波形を推定する手法を提案した。本手法では、建物全層の応答を推定するために基準化された固有振動モード係数を用いている。建物内の2ヶ所で得られた地震動記録の伝達関数から建物の固有振動数を同定し、その振動数に対応した帯域を通過する応答波形に対して基準化した固有振動モード係数を掛け合わせ、それらを重ね合わせることで、観測点以外の層における時刻歴応答波形を推定する方法である。

提案した推定手法の精度を検証するために、質点系解析モデルに対して3次までの振動モードを考慮して線形の時刻歴応答解析を行い、その応答波形について本手法を適用し応答を推定した。解析モデルは、3層から20層までの4つのもを用意し、入力波として2011年東北地方太平洋沖地震における強震ネットワークK-NETの188記録を用いた。頂部の応答波形を基に加速度、速度、変位および層間変形の波形を推定し、応答値の最大値に関する誤差を求めて、本手法の精度を検証した。

その結果、入力された地震波特性によっては、大

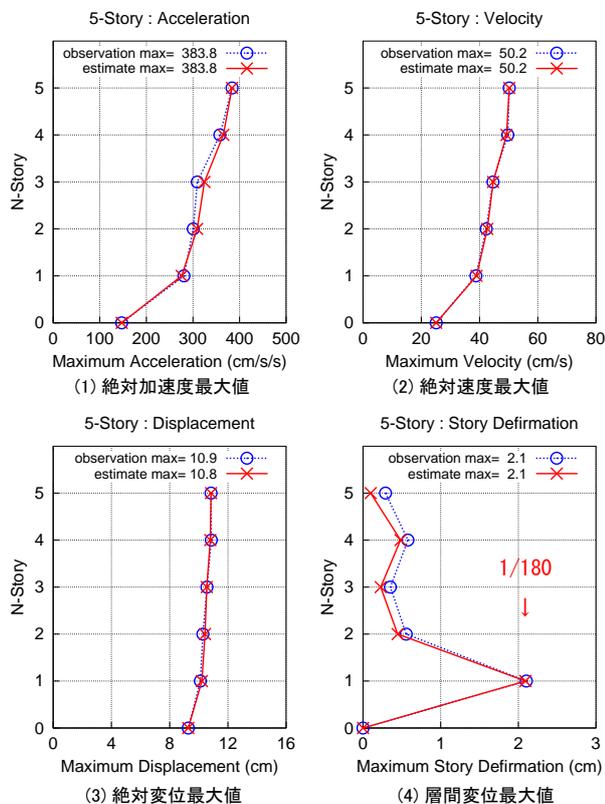


図-26 建物 X 方向の応答推定結果  
(最大値分布図)

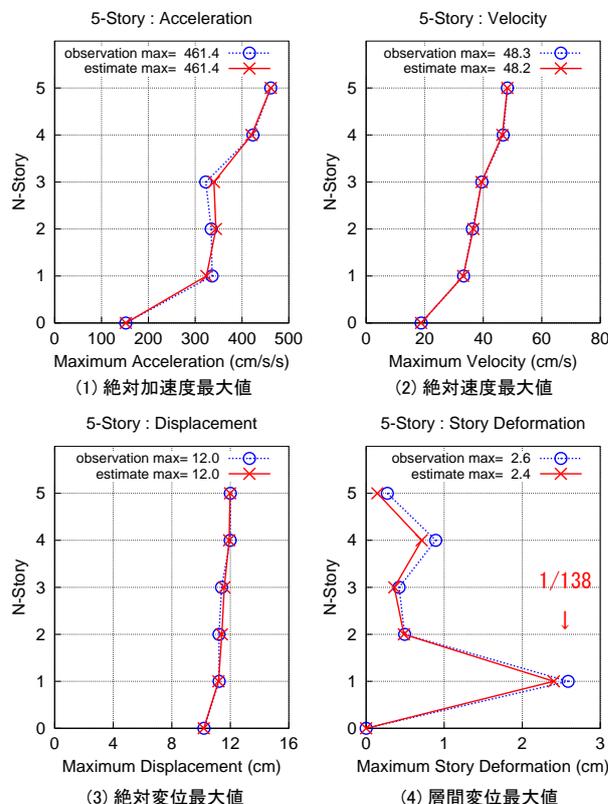


図-27 建物 Y 方向の応答推定結果  
(最大値分布図)

きな誤差をもって推定されるケースがみられるが、低層であればあるほど誤差は小さく、成分としては加速度、速度、変位の順に精度が良く推定される傾向がみられた。具体的には、20層モデルにおける箱ひげ図による誤差の中央値(Q2)は加速度最大値で22.8%、速度では8.7%、変位においては0.6%となり、誤差は、加速度から変位になるに従い小さくなっていく傾向にあった。また、1次モードに限定した応答解析結果については、非常に高い精度で応答推定ができることが確認された。

ついで、実建物での観測記録に対して本手法を適用し、手法の妥当性を確認した。東北地方太平洋沖地震の本震・余震の記録を利用し、建物での振動モードは、過去の地震記録から求めた基準化モード係数を用いて推定を試みた。その結果、応答波形は、非常に精度よく推定できた。当然、最大値の対応も良好であり層間変位最大点における誤差は7.1%以下であった。このことは、本論文で提案している手法は実建物の応答推定に十分適用できることを意味している。

本手法の課題としては、高次モード成分における波形の推定誤差を小さくする処理方法を考える必要がある。入力地震動の特性により、高次振動が卓越するケースでは大きな誤差をもって評価されることもあることから、適切なモード係数の設定が必要である。今後は、こうした問題の改善を考え、推定精度を向上させ、さらに実験や観測による検証を行っていきたいと考える。

## 謝辞

本研究をまとめるにあたり、有益なる御助言と御教示を頂きました弘前大学大学院片岡俊一准教授に深く感謝いたします。

本研究では、防災科学技術研究所の強震ネットワーク K-NET の記録を使わせて頂いた。感謝の意を記します。

## <参考文献>

- 1) Keiichi, O. Yutaka, N. Masaaki, S.: Application of Earthquake Early Warning System to Seismic-Isolated Buildings, Journal of Disaster Research, Vol.4 No.4, Aug. 2009, pp. 242-250.
- 2) 岡田敬一、白石理人、片岡俊一：変位記憶型センサによる構造モニタリングシステムの開発と実建物への適用と検証、日本建築学会技術報告集、第20巻、第44号、2014年2月、pp.61-66.

- 3) 岡田敬一、片岡俊一：長期地震観測データによる建物振動特性の変化とその応答変形推定に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、2011.8、pp.851-852.
- 4) 岡田敬一、片岡俊一：観測データによる建物全層の地震応答推定に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、2012.9、pp.539-540.
- 5) 岡田敬一、片岡俊一：鉄骨造建物の常時微動特性と地震観測データによる全層応答推定、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、2013.8、pp.117-118.
- 6) 品川 祐志、三田 彰：1台の加速度センサのみを用いた建築構造物の振動応答推定手法、日本建築学会技術報告集、第19巻、第42号、2013年6月、pp.461-464.
- 7) 池田芳樹、久田嘉章：限られた階の地震観測記録を用いた建物全層の応答推定、日本地震工学会論文集、第13巻、第4号、2013年4月、pp.38-54.
- 8) 斎藤知生：建物モデルのバイズ更新を用いた地震応答推定と確率的被災度評価、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第683号、2013年1月、pp.61-70.
- 9) 斎藤知生：モード解析型多入力多出力 ARX モデルを用いた高層建物のシステム同定、日本建築学会構造系論文集、第508号、1998年6月、pp.47-54.
- 10) 長松 昭男：モード解析、培風館、1985年、pp.275-293.