限られた階の加速度記録のみに基づく 3 次スプライン補間による 建物全層の応答推定

CUBIC SPLINE INTERPOLATION BASED ESTIMATION OF ALL STORY SEISMIC RESPONSES WITH ACCELERATION MEASUREMENT AT A LIMITED NUMBER OF FLOORS

小寺 健三^{*1}, 西谷 章^{*2}, 沖原 有里奈^{*3}

Kenzo KODERA, Akira NISHITANI and Yurina OKIHARA

Building damage assessment soon after a seismic event is a very significant issue. At present, the sensor implementation of all the floors of a building with not a few stories is not realistic. This paper proposes a framework of estimating all the story responses at about 11-15 story building only with the data of a limited number of accelerometers. Based on cubic spline interpolation, the framework is constructed with the setting of the boundary conditions at the building top and base. The validity of the framework is demonstrated utilizing E-Defense shake table test data.

Keywords : *Boundary condition, Cubic spline interpolation, Seismic response estimation,
Structural health monitoring, 1/3 scale-model 18-story steel building*

境界条件, 3 次スプライン補間, 応答推定, 構造ヘルスマモニタリング, 1/3 鉄骨造 18 層試験体

1. はじめに

2011 年の東日本大震災では、首都圏において多くの帰宅困難者が発生した。今後予想される大地震においても同様の事態が生ずると考えられており、帰宅困難者となった在館者を各施設にて留めるための備えが求められている¹⁾。震災時に建物を継続的に使用するためには、地震直後にその安全性を確認する必要がある。このような背景から、建物内に設置したセンサにより即時安全診断を可能とする、構造ヘルスマモニタリングが注目されている。

東日本大震災時の東京都では、11 階程度の建物から長周期地震動による家具の転倒・移動等の被害が現れはじめた²⁾。都内の 11 階以上の建物のうち、その 9 割以上が、60m を下回ると考えられる 11~15 階建ての建物であり³⁾、都市の防災能力向上を考えた際、こうした建物を無視することはできない。動的特性に関する特別な情報を持たない可能性のあるこうした建物でも、容易に導入可能なヘルスマモニタリング手法の開発が必要である。本研究では、このような 11~15 階程度の建物を対象とする。

建物の損傷判断の基準としては、設計指標ともなっている層間変形角が有効である⁴⁾。変形量と躯体被害の関係に対する知見が整理されており、事前に明確な安全域を設定できるため、災害時における意思決定のための直接的な判断材料として極めて有益である。しかしある程度の階数の建物になると、すべての階にセンサを設置することはコストの面から現実的ではない。この対処法として、刺激関数を既知情報とし、限られた階にのみ設置された加速度センサか

ら全層の層間変形角を推定する研究^{4)~7)}がなされてきている。

刺激関数の入手方法としては、設計情報の参照や、一時的に全層に設置した加速度センサによる推定値を使用すること⁷⁾が想定されており、その取得には手間がかかる。特に 60m 以下の建物では、設計時に動的応答解析が義務付けられておらず、刺激関数は必ずしも算出されていない。

刺激関数等の特別な情報を用いず、少数の加速度センサによって建物全層の応答を推定する手法として、例えば池田・久田⁸⁾によるものがある。この手法は、固有モードごとのバンドパスフィルタの使用や、考慮するモード次数の決定など、建物ごとの調整を必要とする。一方でこうした調整が不要な方法として、Limongelli^{9),10)}による 3 次スプライン補間を用いたものがある。3 次スプライン補間は、ある点群に対し、その点間を滑らかになるように補間する数学的手法である。3 次スプライン補間を用いた応答推定では、時刻ごとの各階応答値を、高さを変数とする連続関数によって表されるものと仮定し、センサ非設置層の応答を推定する。

3 次スプライン補間は、区間端部で境界条件を設定する必要がある。Limongelli は、建物を片持ち梁と捉えた境界条件を提案しているが、この設定は、現実の建物応答を表しているとは言い難い。

本論文では、新しい境界条件を提案し、3 次スプライン補間による全層加速度応答推定を試みる。全層の加速度を把握できれば、そこから全層の層間変形を算出することが可能である。推定精度の検証には、大型震動台 E-ディフェンスで行われた、鉄骨造 18 層 1/3

^{*1} 大成建設 工修
(元早稲田大学大学院)

^{*2} 早稲田大学理工学術院 教授・Ph.D.・工博

^{*3} 早稲田大学大学院創造理工学研究科建築学専攻

Taisei Corporation, M.Eng.
(Former Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda University)
Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Ph.D., Dr.Eng.
Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda University

縮小試験体の加振実験データを用いる¹¹⁾。

以下、2節では3次スプライン補間による応答推定の概要を説明する。3節では、新しい境界条件を伴う3次スプライン補間応答推定手法を提案する。4節で実験データを用いた検証を行い、Limongelliの手法と提案手法の応答推定精度を比較する。最後に5節で本論文のまとめを記す。

2. 3次スプライン補間による応答推定

2.1 3次スプライン補間による応答推定概要

限られた階の加速度計測データから、3次スプライン補間によって各層応答を推定する手法を述べる。

建物振動中、時刻ごとの各層絶対加速度は、建物高さ方向に連続的に分布すると仮定する。このとき、特定層の応答値を計測し、その間を全体として滑らかになるように補間すれば、非計測層の応答値を推定できる(Fig.1)。この際の補間法として、3次スプライン補間(cubic spline interpolation)¹²⁾を用いる。この補間を全時刻で行えば、時刻歴波形として各層絶対加速度を推定できる。全層の加速度データが得られれば、二階積分と上下階での差分計算によって、全層の層間変形を算出できる。3次スプライン補間による応答推定では、必要な情報は、センサ計測値および階高のみである。なお補間対象は、相対加速度や相対変位等でもよい。

Fig.1 Estimation with cubic spline interpolation

建物の応答推定を念頭に、3次スプライン補間¹²⁾について述べる。3次スプライン補間は、各点間を各々独立の3次関数 P_i によって補間するものである。高さ区間 $[z_0, z_N]$ において、センサ設置床レベル $z_0 < z_1 < z_2 < \dots < z_{N-1} < z_N$ があり、その計測値が $g(z_i)$ として表されるものとする。補間する点数が $(N+1)$ 個のとき、補間区間数である N 個の3次関数 P_i (1式)を決定する必要がある。

$$P_i = c_{0,i} + c_{1,i}(x - z_i) + c_{2,i}(x - z_i)^2 + c_{3,i}(x - z_i)^3 \quad (1)$$

$$x \in [z_i, z_{i+1}], i = 0 \sim N-1$$

P_i はそれぞれ4つの未知係数 $c_{k,i}$ を含むため、その決定には $4N$ 個の方程式が必要である。以下の条件から、その方程式が立式される。

(a)各点 $(z_i, g(z_i))$ を通る

$$P_i(z_i) = g(z_i) \quad (2N \text{ 個の方程式}) \quad (2a)$$

(b)各点で、隣接する3次関数の1次導関数が連続

$$P'_i(z_{i+1}) = P'_{i+1}(z_{i+1}) \quad (N-1 \text{ 個の方程式}) \quad (2b)$$

(c)各点で、隣接する3次関数の2次導関数が連続

$$P''_i(z_{i+1}) = P''_{i+1}(z_{i+1}) \quad (N-1 \text{ 個の方程式}) \quad (2c)$$

以上で $(4N-2)$ 個の方程式を立式できる。この条件から、3次スプ

ライン補間は、各点において2次導関数までの連続性が保証される。(b),(c)の条件は、区間端部である z_0, z_N において方程式を記述することができない。よって残り2つの方程式は、両端部における境界条件を設定することで代替する必要がある。境界条件の代表的なものとして、以下が挙げられる。

(1)端部で1次導関数を零とする

(2)端部で2次導関数を零とする

(3)端部の次の点 (z_1, z_{N-1}) で、隣接する3次関数 $(P_0 \text{ と } P_1, P_{N-2} \text{ と } P_{N-1})$ の3次導関数を連続とする(not-a-knot条件¹²⁾)

数点の加速度計測から3次スプライン補間によって応答推定を行う場合、補間点の数が少ないため、境界条件の影響が非常に大きくなる。よって適切な境界条件の設定が大変重要である。

2.2 既往研究における境界条件

Limongelli⁹⁾の応答推定における境界条件をTable 1に示す。1階柱脚部を固定端、頂部で曲げ・せん断力が零、つまり建物を片持ち梁と捉えてモデル化を行っている。表中最下行の3次導関数の条件については、建物頂部での応答値 $\ddot{u}_H(H, t)$ が計測されていれば、 $\ddot{u}(H, t) = \ddot{u}_H(H, t)$ として代替できる。

片持ち梁としてのモデル化は、建物応答が曲げ変形成分のみで表されると仮定していることになる。そのような状況は極めて限定的であり、のちの4.2の検証(Figs.9,10)で示すが、少なくともせん断変形成分が含まれる場合、精度の良い応答推定はできない。

Table 1 Boundary conditions for a multistory building⁹⁾

Height h	Relative displacement x	Absolute acceleration $\ddot{u} = \ddot{x} + \ddot{u}_g$
$h = 0 \forall t$	$x(0, t) = 0$ $x'(0, t) = 0$	$\ddot{u}(0, t) = \ddot{u}_g$ $\ddot{u}'(0, t) = 0$
$h = H \forall t$	$x''(H, t) = 0$ $x'''(H, t) = 0$	$\ddot{u}''(H, t) = 0$ $\ddot{u}'''(H, t) = 0$

$\ddot{u}_g$: ground acceleration H : building height

3. 新しい境界条件を伴う3次スプライン補間応答推定手法の提案

3節では、新しい境界条件を伴う3次スプライン補間応答推定手法を提案する。本手法は、地震波ごとに建物の1次モード形状を推定し、そこから建物頂部側および柱脚部側の境界条件を一義的に決定するものである。

3.1では想定するセンサ配置とモード形状の推定手法について述べ、3.2で建物頂部側、3.3で建物柱脚部側の境界条件について述べる。

3.1 加速度センサの配置およびモード形状推定

提案手法で想定する加速度センサの配置について述べる。まず地動加速度(1階等)は必ず計測する。次に低層階(2~4階、低い方が望ましい)に1台配置する。そしてそれより上層の階にはなるべく均等になるようにセンサを配置する(Fig.2(a)、4節と関連させ18階建て建物の例を示す)。対象建物を11~15階程度と考えれば、使用センサ台数は4~5台が適切と考える。4台で本手法を行う場合は、低層側の間隔をやや密にしつつも、ほぼ均等な配置とする。

低層階の階高のみの大きな変化、ピロティ形式による壁量減少、

基礎との接合による回転剛性などが低層部の剛性に影響を与える。剛性が層間で大きく変化する場合には、加速度等の応答分布も不連続となることが予想されるため、低層部で直接計測を行うことが望ましい。上記要因は1層において生じる可能性が高く、センサ配置はできるだけ下層よりがふさわしい。

以上のようなセンサ配置から、固有直交関数展開(POD)^{13),14)}によって建物の1次モード形状を推定する。PODでは、(3)式で表される、観測応答値による空間相関行列 R_q の固有値解析を行う。空間相関行列では、対角要素が各層計測応答値の分散値、その他の要素が他層計測値との共分散を表す。この行列の最大固有値に対応する固有ベクトルを、1次モード形状の計測層における値と見なす。

$$[R_q] = [Y^T Y] \quad (3)$$

ここで、

$$Y = \begin{bmatrix} y_1(0) & \cdots & y_i(0) \\ \vdots & & \vdots \\ y_1(N) & \cdots & y_i(N) \end{bmatrix}$$

$y_i(k)$: 下から i 番目の計測層の時刻 $k\Delta t$ における計測値
 N : 全データ数

- より高精度なモード形状推定のため、本論文では以下の手順により1次モード形状を推定している(丸括弧内には処理の目的を示す)。
- ①観測加速度に対し、両端部の境界条件を not-a-knot とした3次スプライン補間を適用し、全層の相対加速度応答を仮推定する。
(PODにおけるデータ数を多くすることで、精度を向上させる。)
 - ②その加速度から全層相対変位を算出する。(変位にすることで、高次モードの影響が相対的に小さくなる。)
 - ③最も上層に設置した加速度センサから求めた相対変位において、各時刻応答値の二乗積和を計算し、その総和に対し二乗値累積和が0.1~99.9%となる区間の時刻を求める。
 - ④②の全層相対変位において、③で求めた区間のみのデータに対しPODを適用する。(地震前後の振動していない部分を取り除き、振幅の大きい区間のみでモード推定を行う。)
 - ⑤センサ設置階に対応するモード値のみを抽出し、最終的な推定1次モードとする(Fig.2(b))。

Fig.2 Sensor locations and estimated 1st mode of 18-story building model

3.2 建物頂部側境界条件

建物頂部側における境界条件について述べる。建物頂部側の境界条件として「頂部零点高さ」を設定する。建物をせん断型と仮定した場合、モード形状は一般的に Fig.3 のようになる。いずれのモー

ドでも、上層部において、その形状に対する傾き(1次導関数)が零に収束する傾向を示す。本論文では、各次モード頂部のさらに上方に、実際に1次導関数が零に収束する点が存在すると仮定する。そして建物頂部から収束点までの高さ h_0 が全モードで同じであるとする。これにより、各次モードの重ね合わせである実際の応答でも、高さ h_0 にて応答分布形状の1次導関数は必ず零になる。この1次導関数が零となる点を「頂部零点」、建物頂部からの高さ h_0 を「頂部零点高さ」と定義する。

Fig.3 Location with 1st derivative equal to 0

頂部上方で1次導関数を零とする仮定を、3次スプライン補間における建物頂部側境界条件として利用する。ある時刻におけるセンサ設置階の応答値が得られているとする(Fig.4(a))。その値を、Fig.4(b)のように、頂部零点高さ h_0 を境に鏡像反転する。このとき、鏡像反転したものを含む全体に対し3次スプライン補間を適用すると、 h_0 を境に上下対称の形状となる。つまり高さ h_0 が決定されれば、その高さにて補関関数の1次導関数を零とすることができる。 h_0 はあくまで建物頂部からの高さであり、必ずしも建物最頂部にセンサが必要なわけではない。

Fig.4 Symmetry point with 1st derivative equal to 0 by means of mirror image principle

層間変位は、上下階の相対変位の差分である。つまり層間変位の推定では、高さ方向における相対変位分布の変化率(以下、カーブの程度という意味で単に「曲率」と呼ぶ)を適切に推定することが重要である。3次スプライン補間による応答推定では、時刻ごとの独立した推定となるため、計測値の分布状態によっては、常に精度の良い推定ができるとは限らない。よって頂部零点を付与し、上層部で応答分布の1次導関数を常に零へ収束させ、推定を安定させる。

ここで頂部零点高さ h_0 の決定方法について述べる。その決定には、観測応答値から推定した1次モード形状を使用する。その推定1次モードの各点に対する、4種類の補関数 P を考える。

- (1) P_s ：モード各点間の直線補関による関数
 - (2) P_k ：両端 not-a-knot 条件の3次スプライン補関による関数
 - (3) P_0 ： $h_0 = 0$ として、推定1次モードを鏡像反転する。Fig.4(b)のように、鏡像反転したものを含む全体に対して両端 not-a-knot 条件の3次スプライン補関を適用した関数
 - (4) P_m ：ある零点高さ h_0 を仮定し、上記(3)のように、モードを鏡像反転し、鏡像反転したものを含む全体に対して両端 not-a-knot 条件による3次スプライン補関を適用した関数
- 推定モード値の最頂部区間(Fig.2の例では13F~RFに相当)において、 P_s と P_k で囲まれる面積 $S_{s,k}$ 、 P_k と P_0 で囲まれる面積 $S_{k,0}$ を定義する(Fig.5(a))。同様に、 P_s と P_m で囲まれる面積 $S_{s,m}$ 、 P_k と P_m で囲まれる面積 $S_{k,m}$ を定義しておく(Fig.5(b.1,b.2))。

本研究の対象とする11~15階程度の建物では、ある程度アスペクト比が大きくなり、応答に曲げ変形成分が含まれると考えられる。よってまず応答がせん断変形成分のみの理想的な場合の決定法を示した後、せん断変形成分と曲げ変形成分が混在する、実建物を想定した修正法について述べる。

せん断変形のみによって表される場合には、補関数 P_k は、推定モード値間を、特別な条件を付けず曲線的に補関することで、真値モード形状を推定する。最頂部区間において、 P_k と同じ曲率を与える頂部零点高さ h_0 を、応答推定における h_0 とする。このような h_0 を決定するためには、 P_k と P_m とが最頂部区間で近い形状となればよい。そこで P_s を基底として面積 $S_{s,k}$ 、 $S_{s,m}$ を定義し、これらが一致する h_0 を、その地震応答推定における零点高さとする。

次に実際の建物で想定される、応答がせん断変形成分と曲げ変形成分の和で表される場合について述べる。Fig.6(b)に示すように、曲げ変形モードは上層部でほぼ直線となる。応答に曲げ変形成分が含まれる場合、1次モードはせん断モードと曲げモードを合成したような形状として推定される。つまりFig.6(c)に示すように、推定1次モードは上層部で曲率の小さい直線的な形状となる。ここで、補関数 P_0 は、 $h_0 = 0$ の場合であり、モードの最頂部区間において最大曲率のモード形状を与える。導関数が零に収束するためモード最頂部区間で曲率が大きくなる、せん断型モード形状の P_k は P_0 に近くなる。一方、上層部で直線的となる、全体曲げの影響を受けるモードの P_k は直線補関 P_s に近い形状となる。形状が近いと両者が囲む面積も小さくなる。よって面積 $S_{s,k}$ が $S_{k,0}$ よりも小さくなる場合に、全体曲げの影響が含まれるものと判断する。

全体曲げの影響が認められた場合、 P_k よりも大きな曲率を持たせることによって、擬似的にFig.6(a)のせん断型のみモード形状の上層部曲率を再現する。厳密にどの程度の割合で曲げ変形が含まれるかの判断は簡単ではないが、今回は P_m が $S_{k,0}$ をちょうど二分割するとき、すなわち $S_{k,m}$ が $S_{k,0}$ の半分となるとき h_0 を、頂部零点高さとしている。

頂部零点高さ h_0 の決定法をまとめると、以下ようになる。

- ① $S_{s,k} \geq S_{k,0}$ の場合： $S_{s,k} = S_{s,m}$ となる高さ(Fig.5(b.1))
- ② $S_{s,k} < S_{k,0}$ の場合： $S_{k,m} = S_{k,0}/2$ となる高さ(Fig.5(b.2))

Fig.5 Determination of h_0 based on estimated 1st mode

Fig.6 Estimated 1st mode including shear and bending deformations

3.3 建物柱脚部側境界条件

建物柱脚部側(1階柱脚部等)の境界条件として、その柱脚の固定度を考える。

建物の応答を、「柱脚固定」と「柱脚ピン」の間である「柱脚半固定」の状態であると仮定する。3次スプライン補関の境界条件において、「柱脚固定」は1次導関数が零の場合であり、「柱脚ピン」はnot-a-knot条件にあたる。後者は、3次スプライン補関の全体としての連続性を優先するものであり、端部における導関数(つまり回転)について一切の拘束がないため、ピンの境界条件として妥当である。それぞれの境界条件による応答推定結果を、ある比率で重ね合わせることによって、擬似的に「柱脚半固定」の状態を再現する。

この比率の決定に、PODによる推定1次モード形状を用いる。まず、推定1次モードにおける下から2番目の点(Fig.2の例では2階の値、以下2F値)を無視して、先に決定した頂部零点高さ h_0 を用いてモードを鏡像反転する。2F値を無視しているため、例えば5台のセンサを使用している場合、4階分のモード値を鏡像反転するため、モード値は全部で8つとなる。この鏡像反転したものを含む全体に対し、両端の境界条件を「固定」と「ピン」とする2通りで3次スプライン補関を行う。この条件下で3次スプライン補関を適用した場合の、モード柱脚部を拡大したものをFig.7(A)に示す。

Fig.7(A)において、2階のモード値を考慮していないため、それぞれの境界条件での3次スプライン補関において2F値は一致していない。ここで、それぞれの3次スプライン補関の結果をある比率で足し合わせ、元の2F値と一致させることを考える(Fig.7(B))。その際、境界条件を「固定」としたものにかかる係数 x を「柱脚固定度」として定義する。固定条件およびピン条件での2F値と、元の2F値との差をそれぞれ a, b とすると、 x は(4)式のように表せる。

$$x:(1-x) = \frac{b}{a+b} : \frac{a}{a+b} \quad (4)$$

ただし、

$$a = q - p, \quad b = r - q$$

p : 固定条件による 2F 値

q : 推定 1 次モードの 2F 値

r : ピン条件による 2F 値

Fig. 7 Degree of fixation at base floor

柱脚固定度 x となる半固定状態の実現手順を以下に示す。Fig.8のように、頂部零点高さ h_0 を用いて応答値を鏡像反転する。鏡像反転したものを含む全体に対し、両端部の境界条件を固定(1次導関数零)およびピン(not-a-knot)として、それぞれ 3 次スプライン補間を適用する。これらに x および $(1-x)$ の比率を乗じて足し合わせることで、柱脚半固定の応答状態を再現する。なお 2F 値を無視するのは 1 次モードから柱脚固定度 x を求める際のみであり、Fig.8 の段階では全ての計測点の値を使用する。

Fig. 8 Synthesis of Fix and Pin conditions

3.4 応答推定の手順

「頂部零点高さ h_0 」および「柱脚固定度 x 」を用いて応答推定を行う際の手順を以下に示す。

- ①観測絶対加速度に対しノイズ除去のためのフィルタ処理(15Hz 程度のローパスフィルタ等)を適用する。
- ②POD により 1 次モード形状を推定する。
- ③頂部零点高さ h_0 を決定する。
- ④決定した h_0 を用い、柱脚固定度 x を決定する。
- ⑤①でフィルタ処理を行った絶対加速度において、Fig.8 で示した手法を時刻ごとに適用し、センサ非設置階の時刻歴絶対加速度波

形を推定する。

- ⑥⑤の推定波形に①と同じフィルタを適応したものを、最終的な推定絶対加速度波形とする。(3 次スプライン補間による応答推定は、時刻ごとに独立した推定となるため、高振動数帯の成分が大きくなる可能性がある。これを取り除くための処置である。)
- ⑦推定した全階の加速度を二階積分して相対変位を算出、上下階での差分計算を行い、全層の層間変位を求める。

4. 鉄骨造 18 層試験体実験による検証

4.1 実験概要^{(1), (15)}

防災科学技術研究所兵庫耐震工学センターの実大三次元震動破壊実験施設(以下、E-ディフェンス)で 2013 年に行われた、鉄骨造 18 層縮小試験体実験のデータを用い、提案手法の検証を行う。この実験は、文部科学省の「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト(2012-2016 年度) サブプロジェクト②: 都市機能の維持・回復に関する調査研究」にて実施されたものである。多くの企業の本社機能を担う高層鉄骨造建物の、長周期地震動を受けた際の損傷進展と崩壊に至るまでの過程の把握を目的としている。

試験体は、鉄骨造純ラーメン構造 18 階建て建物の 1/3 スケールモデルである。平面 6m×5m(2m×3 スパン、5m×1 スパン)、高さ 25.34m(基準階高:1.35m、1 階:1.7m、RC 基礎 0.7m)となっている。

入力地震波は南海トラフ地震を想定して作成された長周期地震動である。継続時間は 460 秒、擬似速度応答スペクトル($h=0.05$)は周期 0.8 秒以上でほぼ一定値(180cm/s)となっている。入力は長手方向への 1 方向加振であり、入力地震波の速度応答スペクトルの大きさを順次増加させて繰り返し加振を行い、最終的に崩壊に至らしめた。本検証で用いる加振ケースとその際の試験体損傷の様子を、Table 2 に示す。各加振ケース名の数字は、入力地震波のスペクトルレベルを示す。なおレベル 110cm/s, 180cm/s の加振はそれぞれ二回行われているが、ここでは一回目の加振データのみを用いるものとする。

Table 2 Experimental cases and damage states⁽¹⁵⁾

Case	μS_r Level(scale)	Peak drift angle	Damage states
40	40cm/s(0.37)	0.0057rad(14F)	No damage(elastic)
81	81cm/s(0.74)	0.0091rad(3&14F)	2~4F beam end yield
110-1	110cm/s(1.00)	0.0106rad(14F)	2~7F beam end & 1F column base yield
180-1	180cm/s(1.64)	0.0161rad(11F)	2~14F beam end yield
220	220cm/s(2.00)	0.0189rad(11F)	2F beam end rupture

4.2 提案手法の検証

試験体には、健全度把握を行うことを目的とした加速度センサ(サーボ型 3 軸加速度計、東京測振 AS-3357、200Hz サンプリング)が全階に設置されている。このうち特定階のみのセンサ計測値を用い、全層の絶対加速度および層間変形を推定できるか検証を行う。

比較として、Limongelli⁽⁹⁾の境界条件による応答推定(以下、Limongelli 手法)を行う。Limongelli は、センサ配置を建物の刺激関数を用いて決定する手法を提案している。よって Limongelli 手法では、実験報告書⁽¹⁵⁾に記載されている試験体解析モデルの刺激関数を用いてセンサ配置を決定した。提案手法でのセンサ配置は、3.1 で述べた配置法とする。5 台のセンサを使用する場合の、Limongelli 手法と提案手法(proposed)におけるセンサ配置階を Table 3 に示す。両手法とも、観測値に対しノイズ除去用の 15Hz ローパスフィルタ

を適用し、積分は 0.2Hz ハイパスフィルターを用いて周波数領域上で行う。層間変形角の真値は、応答推定と同様の積分手法により全層の加速度センサから算出したものを「観測値」とする。

Fig.9 に最大絶対加速度、Fig.10 に最大層間変形角の推定結果を示す。推定精度の定量的評価を行うために、 i 層の観測最大応答値($q_{o,i}$)と推定最大応答値($q_{c,i}$)を用い、最大値誤差率 $\varepsilon_i = (q_{c,i} - q_{o,i})/q_{o,i}$ を計算する。絶対加速度の最大値誤差率を $\varepsilon_{acc,i}$ 、層間変形角の最大値誤差率を $\varepsilon_{sd,i}$ とし、加振ケースごとの各層最大値誤差率の Box plot(箱ひげ図)を Fig.11 に示す。Box plot はサンプルのばらつきを示す統計図であり、四分位数(第 1 四分位点から第 3 四分位点までの範囲)を箱で表現し、中央値でその箱を区切る。最大値および最小値を線端として表し、外れ値を+(クロス)によって示す。今回の外れ値の定義は、箱の上下端部から四分位数の 1.25 倍を超えるものとしている。波形推定結果の例として、case110-1 における 3 層および 14 層の層間変位の最大値発生時刻付近を Fig.12 に示す。Fig.11 および Fig.12 は、観測値および提案手法による推定値(proposed)のみの比較である。Fig.13 には、各ケースで決定された頂部零点高さ h_0 および柱脚固定度 x の値を示す。

4.3 考察

検証により得られた知見を以下にまとめる。

- (1)Figs.9,10 に示したように、既往手法である Limongelli 手法では、建物柱脚部および頂部の両端部において推定精度が極端に落ちることがわかる。これは明らかに境界条件が不適切なためである。これより、せん断変形成分が含まれる応答において、曲げ変形成分のみを考えた境界条件を適用することは妥当ではないと考える。
- (2)提案する境界条件を用いた場合、全層応答を精度よく推定できる。特に case220 では、最大層間変形角が 0.02 rad(1/50)に近く、塑性応答を示す大変形となっているが、精度よく推定が行えている。さらに Fig.12 は、時刻歴波形においても高精度な推定が可能であることを示している。
- (3)Fig.11 は、提案手法では各層応答の最大値を概ね誤差 10%程度の精度で推定できることを示している。(case180-1,case220 の層間変形角における外れ値は、他層と比較して観測値がかなり小さくなる最上層での値であり、特に問題ないと考えている。)
- (4)Fig.13 は、頂部零点高さ h_0 及び柱脚固定度 x を、弾塑性問わず一定値で決定可能であることを示している。この結果は、提案手法の安定性を証明するものとする。なお h_0 は全てのケースにおいて、実建物を想定した、せん断変形成分と曲げ変形成分が混在する場合(Fig.5(b.2))として決定された。今回は 18 階建て建物での検証ではあるが、主対象とする 11~15 階建て建物と大きな違いはなく、本手法は適用可能であると考える。

5. まとめ

本論文では、階高以外の建物情報を一切用いない条件の下、限られた階の加速度計測によって全層応答を推定する手法を提案した。

Fig. 9 Peak accelerations

Fig. 10 Peak drift angles

Fig.11 Box plot of relative errors of estimated responses derived by proposed method

Fig.12 Inter story drift displacements (case110-1)

Fig.13 Values of h_0 and x

提案手法は、観測データが与えられれば一義的な推定結果を得ることができる。提案手法による応答推定精度を、E・ディフェンスで行われた大型試験体実験のデータを用いて検証した。検証結果をまとめると、提案手法は、最大層間変形角が 1/50 となるような大変形に至るまで、各層最大絶対加速度および最大層間変形角について誤差 10%程度での推定精度を維持できるものといえる。

提案手法は、建物ごとの特別な情報を必要とせず、建物に少数の加速度センサを設置するのみで、高精度な応答推定を実現するものである。導入の容易さは、コストの面でも大変優位となる。ヘルスマonitoringの簡便化および低コスト化は、その幅広い普及を促し、都市の防災能力の向上に大いに貢献できると考える。

本手法による 3 次スプライン補間での全層応答推定は、特定層の層間変位が得られる場合(例えば層間変位センサ¹⁶⁾)にも応用が可能である。今後その結果についても発表したい。

謝辞

本研究において、国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」

より「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」¹¹⁾のデータを使用させて頂きました。また本研究は科研費・基盤研究 C(課題番号 26420564; 代表者 西谷章)の助成を受けて実施されたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) The Cabinet Office, Government of Japan: The Task Team Final Report on Counterplan for People Who Have Difficulty Returning Home After an Earthquake Directly Hits Tokyo Area. 2012.9 (in Japanese)
内閣府: 首都直下地震帰宅困難者等対策協議会最終報, 2012.9
- 2) Tokyo Fire Department: The Task Team Report on Safety Counterplan of Upper Room of High-Rise Building for Long-Period Ground Motion in FY 2011, pp.48-50, 2012.2 (in Japanese)
東京消防庁: 平成 23 年度長周期地震動等に対する高層階の室内安全対策専門委員会 報告書, pp.48-50, 2012.2
- 3) Tokyo Fire Department: Tokyo Fire Department 67th Statistical Documentation in 2014, 2015 (in Japanese)
東京消防庁: 第 67 回東京消防庁統計書(平成 26 年), 2015
- 4) Tomoo SAITO: Evaluation of Seismic Response of Buildings and Probabilistic Damage Estimation Applying Bayesian Model Updating, Journal of Structural and Constructions Engineering (Transaction of AIJ), Vol.78, No.683, pp.61-70, 2013.1 (in Japanese)
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, pp.61-70, 2013.1
- 5) Takeshi MORII, et al.: Seismic Response Estimation of Whole Building Based on Limited Number of Acceleration Records for Structural Health Monitoring System Shortly After an Earthquake-System Application for Large Shaking Table Test of a 18 Story Steel Building-, Journal of Structural and Constructions Engineering (Transaction of AIJ), Vol.81, No.730, pp.2045-2055, 2016.12 (in Japanese)
森井雄史, ほか 6 名: 地震直後における建物健全性評価のための限られた階の加速度記録に基づく建物全層応答推定手法 —鉄骨造 18 層試験体の震動台実験結果に基づく検討—, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 730 号, pp.2045-2055, 2016.12
- 6) Keiichi OKADA, et al.: Verification of All Story Seismic Building Response Estimation Method from Limited Number of Sensors Using Large Scale Shaking Table Test DATA, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.23, No.53, pp.77-82, 2017.2 (in Japanese)
岡田敬一, ほか 2 名: 少数センサによる建物全層の地震応答推定手法の大型振動台実験データを用いた検証, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 53 号, pp.77-82, 2017.2
- 7) Yu SUZUKI and Akira MITA: Output Only Estimation of Inter-Story Drift Angle for Buildings Using Small Number of Accelerometers, Journal of Structural and Constructions Engineering (Transaction of AIJ), Vol.81, No.725, pp.1061-1070, 2016.7 (in Japanese)
鈴木悠, 三田彰: 少数の加速度センサを用いた出力のみによる建物の層間変形角推定手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 725 号, pp.1061-1070, 2016.7
- 8) Yoshiki IKEDA and Yoshiaki HISADA: Earthquake Responses on All Floors in a Building Estimated by Observation Records on Some Restricted Floors, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol.13, No.4, pp.4_38-4_54, 2013.8 (in Japanese)
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階の応答推定, 日本地震工学会論文集, 第 13 巻, 第 4 号, pp.38-54, 2013.8
- 9) Maria Pina Limongelli: Optimal Location of Sensors for Reconstruction of Seismic Responses through Spline Function Interpolation, Earthquake Engng Struct. Dyn., Vol.32, pp.1055-1074, 2003.6
- 10) Maria Pina Limongelli: Performance Evaluation of Instrumented Buildings, ISET Journal of Earthquake Technology 2005, Paper No.455, Vol.42, No.2-3, pp.47-61, 2005 June-September
- 11) National Research Institute for Earth Science and Disaster

- Resilience: Collapse Margin of High-Rise Buildings, “ASEBI”,
 <<https://www.edgrid.jp>> (in Japanese) (accessed 2017.1.20)
 国立研究開発法人防災科学技術研究所 ASEBI より 鉄骨造高層建物の
 崩壊余裕度の定量化 <<https://www.edgrid.jp>> (参照日 2017.1.20)
- 12) Carl de Boor: A Practical Guide to Splines (Revised Edition),
 Springer-Verlag New York Inc., 2001
 - 13) Yukio TAMURA: An Introduction of Applying Proper Orthogonal
 Decomposition to Random Fields, J. of Wind Engineering, No.65,
 pp.33-41, 1995.10 (in Japanese)
 田村幸雄: 固有直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ, 日本
 風工学会, 第 65 号, pp.33-41, 1995.10
 - 14) Yoshihiro NITTA and Akira NISHITANI: Structural Identification
 Utilizing Measurement Absolute Acceleration, Summaries of
 Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan,
 B-1, pp.313-314, 2002.8 (in Japanese)
 仁田佳宏, 西谷章: 絶対加速度出力のみよる構造物のシステム同定, 日
 本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.313-314, 2002.8
 - 15) R&D Dep. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and
 Technology, and Kyoto University Disaster Prevention Research
 Institute: 2013 Report on Special Project for Reducing Vulnerability
 for Urban Mega Earthquake Disasters (ii) Maintenance and
 Recovery of Functionality in Urban Infrastructures, 2014.5 (in
 Japanese)
 文部科学省研究開発局, 京都大学防災研究所: 都市の脆弱性が引き起こ
 す激甚災害の軽減化プロジェクト ②都市機能の維持・回復に関する調
 査研究 平成 25 年度 成果報告書, 2014.5
 - 16) Ryuta KATAMURA, et al.: Verification of Damage Monitoring
 System Based on Measurement of Relative Story Displacements in
 E-Defense Shaking Table Test of High-rise Steel Building: Part-1
 System Outline, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting,
 Architectural Institute of Japan, B-2, pp.59-60, 2014.9 (in Japanese)
 片村立太, 他: 層間変位計測に基づいた損傷モニタリングシステムの E-
 ディフェンス S 造高層建物実験による検証 その 1 システムの概要, 日
 本建築学会大会講演梗概集, 構造 II, pp.59-60, 2014.9

CUBIC SPLINE INTERPOLATION BASED ESTIMATION OF ALL STORY SEISMIC RESPONSES WITH ACCELERATION MEASUREMENT AT A LIMITED NUMBER OF FLOORS

Kenzo KODERA^{*1}, Akira NISHITANI^{*2} and Yurina OKIHARA^{*3}

^{*1} Taisei Corporation, M.Eng.

(Former Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda University)

^{*2} Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Ph.D., Dr.Eng.

^{*3} Grad. Student, Dept. of Architecture, Waseda University

It is significant to accurately evaluate how a building is damaged soon after a seismic event from the building use continuation judgement point of view. As an effective tool for such a judgement, structural health monitoring (SHM) schemes have appealed the attentions of structural engineers. In conducting SHM for a building structure, it would be desirable to install sensors into all the stories. At the present stage, however, such a sensor installation scheme would be expensive, and thus it would be realistic to construct the SHM strategy based on the use of a limited number of sensors. From the point of view of what kind of responses are appropriate for effective SHM, on the other hand, inter story drift deformation could be a powerful index. The second authors' research group has developed a direct measurement devise sensing drift displacements. Accounting for the fact that accelerometers have been much more practically utilized, this paper proposes a methodology which would estimate the drift deformations for all the stories with accelerometer implementation on a limited number of floors.

The beneficial point of the proposed method is to derive all of the necessary information with respect to a building from the measured response data. In other word, the estimation of all the stories' responses is conducted based on only the accelerometer data. The method proposed in this paper utilizes cubic spline interpolation (CSI). In applying CSI to building's response interpolation, how to set the end conditions at the top floor and base floor locations is very significant. This paper proposes how those end conditions should be set. As the boundary condition with respect to the building top floor vicinity, the location over the top floor at which the first derivative of the response distribution is always zero is introduced. This location is to be determined from the first mode shape of a building. As above-mentioned, however, this method does not use other information than the measured acceleration data. The first mode shape is derived from the acceleration responses. For the boundary condition at the base floor location, the degree of fixation at the base floor is accounted for. The semi-fixed boundary condition is introduced by mixing the fixed and pin base conditions. The mixing ratio of these two is also determined from the derived first mode shape. Employing the two newly-employed boundary conditions, all the story responses are estimated accurately.

The validity of the proposed method is demonstrated by using the experimental data from the E-Defense shake table tests of a 1/3 scale model steel building with eighteen stories in December 2013. In this experiment, the model building was repeatedly shaken with simulated long-period ground motions with different magnitudes. The ground motion became larger and larger until the model building was collapsed. Employing the data measured by five accelerometers set on the first, second, seventh, thirteenth and roof top floors for some cases of the experiment, the paper demonstrates how accurately the acceleration response time histories of all the stories are estimated and then the drift deformation time histories are estimated.

The interpolation method proposed in this paper provides an accurate estimation of all the story responses. It would lead to an accurate judgement framework of story-based damage states only with the installation of a limited number of sensor and without any of pre-information on the motion characteristics of a building, such as mode shape function.

(2017 年 6 月 9 日原稿受理, 2017 年 12 月 19 日採用決定)