少数センサによる建物全層の地震応答推定手法の大型震動台実験データを用いた検証

VERIFICATION OF ALL STORY SEISMIC BUILDING RESPONSE ESTIMATION METHOD FROM LIMITED NUMBER OF SENSORS USING LARGE SCALE SHAKING TABLE TEST DATA

岡田敬一 ——— * 1 森井雄史 ——— * 1
白石理人 ——— * 1

Keiichi OKADA ——— * 1 Takeshi MORII ——— * 1
Michihito SHIRAISHI ——— * 1

キーワード：

構造ヘルスモニタリング, 加速度計, 応答推定, バイズ更新, 加速度応答, 層間変形, 大型震動台実験

Keywords:

Structural health monitoring, Accelerograph, Seismic response estimation, Bayesian updating, Acceleration response, Inter-story displacement, Large shaking table test

This paper propose a method to estimate overall building responses during an earthquake using acceleration records from limited seismographs those have input-output relationship. The design model of the building is updated to a model closer to reality by applying Bayes' theorem, to estimate building responses. The method is applied to seismic response analysis results, which shows extremely precise evaluation ability of the method. To evaluate the accuracy of the method, the method was applied to using large shaking table test where building responses of each layer have been recorded. The response estimation results substantially match the actual observations.

1. はじめに

近い将来にも南海トラフの巨大地震や首都直下地震などの発生が懸念されているが、このような大地震の発生後には建物の損傷状況を把握し、その継続使用の可否判断を速やかに行う必要がある。専門家の現地調査に基づく判断に頼る従来の方法では、広域な巨大地震や大都市圏の地震対応には限界があり、地震後に速やかに建物の健全性を判定する構造ヘルスモニタリングシステムの導入が期待されている。筆者らは、地震発生後に建物の健全性を即時に判定し、避難・待機の判断ができる地震時建物健全性判定支援システムを開発した^{1), 2)}。システムで用いる地震応答推定手法は、建物モデルをバイズ更新により修正することで、設計情報を活用しながらも実際の応答に近づけることが可能である³⁾。本報告では、この少数センサによる建物全層の地震応答推定手法について、E-ディフェンスの大型震動台によって実施された「縮小20層RC造建物試験体の長周期地震動による震動実験」データ^{4)~8)}を利用して検証した結果を報告する。

2. システム概要

本システムは、限られた階に設置された少数センサの観測記録を用いて建物全層の応答を推定し、対象建築物の健全性判定等を行う、地震モニタリングシステムである。地震時の最大層間変形角や加速度等の応答値により構造躯体や仕上げ材の健全性を判定する。建物のすべての階に必要なセンサを設置することで直接的に地震時の建物全層の応答を計測することが可能であるが、費用の制約、システムの複雑化などの問題から現実的には設置数が限られる^{9)~11)}。こうした点を考慮し、本システムでは少数のセンサによる建物の応答を正確に推定するために地震応答推定手法³⁾を適用している。

開発されたシステムの機器構成を図1に示す。観測センサには3成分の加速度計（サーボ型、半導体型など地震応答計測に必要な性

能があるもの）を用い、記録をデータロガーもしくはデータ解析用専用パソコンに収集（サンプリング周波数は100Hzもしくは200Hz）する。収録されたデータは直ちに地震応答推定に用いられ、1分程度で健全性が判定される。建物の管理者や使用者に通知するディスプレイ表示には、層間変形角を指標とした構造躯体の健全性判定の他、震度階級、長周期地震動階級、加速度を指標とした内装材の損傷度などを情報が、色分けされた判定結果として出力される。また、専門家が評価結果の詳細を確認する画面として、図2に示す最大応答グラフ（層間変形角分布、速度応答分布、加速度応答分布）を表示とする画面も用意されており、本報告での建物全層の地震応答推定手法の適用性を評価するための結果画面に相当する。

図1 システムの概要図

3. 地震応答推定手法

建物の地震応答推定は、事前に設定した固有値解析モデル（質量 m 、剛性 k 分布）と少数センサの観測データを用いて「バイズ更新」により解析モデルの剛性 k' 分布を最適値に更新し、この更新モデルの固有モード（刺激関数）と観測データから建物全層の応答時刻

¹⁾ 清水建設技術研究所 主任研究員・博士（工学）
〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17

¹⁾ Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

歴波形を推定する手法を利用する³⁾。この手法では、建物設計モデルと実建物モデルとの違いを補正することで、建物の固有モードが変化した場合にも、応答を精度良く推定することができる。

図3に少数センサからの応答推定手法の概要を示す。全層の加速度波形は、限られた階の加速度記録とバイズ更新によって補正された剛性分布を基に、モード合成法に基づいて推定する。応答推定で求められた全層の加速度波形を数値積分することによって、速度波形、変位波形を求める。数値積分では、ローカットフィルター処理（構造体固有振動特性によって選択:0.1Hzから0.3Hz以下で除去）をする。また、隣接階での変位波形の差分を取ることで層間変形が計算でき、階高で除することで層間変形角を求めることができる。これらの求められた各波形から、計測震度、長周期震度階級（速度応答相当）などを計算し、各最大応答値として求め、各判定の閾値と比較し健全性を判定する。

図2 建物健全性判定の表示例（層間変形角，速度，加速度）

図3 少数センサからの全層応答推定手法の概要

4. 縮小20層RC造の震動台実験データ

4.1 実験データの前処理

地震応答推定手法の適用性の評価には、E-ディフェンスの大型震動台で実施された縮小20層RC造建物試験体(高さ15.8m, 階高0.75m, 実大1/4縮小模型)⁴⁾の加振実験で計測されたデータを利用する。試験体には、1階から21階(R階)までの対角の隅部(A1側, A3側)の各階に設置された水平方向の加速度計の記録を用いる。実験データの前処理として、同じ階に位置する2つの加速度計の波形和

の平均から並進成分を求めた。本報告では、このうち主加振軸であるX方向(桁行)の加速度データを用いた検討結果を報告する。

4.2 応答推定評価のための実験加振データ

実験加振ケースの一覧を表1に示す⁵⁾。実験では、試験体の振動特性変化を把握するためのランダム波加振と地震波加振(東京観測波、津島波)がある。地震波加振では、東京観測波の3軸加振で4ケース(#1-4, #1-5, #2-2, #2-6)、津島波の1軸加振(X方向のみ: 2ケース, #3-2, #3-5)として、順次加振レベルを上げて、最終層間変形角の目標が1/50以上になるまで加振実験が行われている。各地震波加振ケースで得られた加速度、層間変形の最大応答分布図を図4に示す。このうち層間変形は、加速度波形(サンプリング周波数: 200Hz)を周波数領域で2階数値積分し、さらに長周期成分の影響を除く0.125Hz(8秒)のローカットされた変位波形から隣接階の相対変位(層間変形)として求めている。この層間変形分布は、局所的な変形応答のばらつきが比較的大きいが、加速度分布は、滑らかな変化の分布となっていることがわかる。このように全階の加速度センサから求めた結果を以降では「観測値」と呼ぶ。

表1 震動台実験の地震波加振ケース一覧

加振 ケース名	加振データ種別	最大応答加速度(cm/s^2)		最大層間変形角(rad)	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向
#1-2	ランダム波3軸 40gal	--	--	--	--
#1-4	○ 東京観測波 40%	180	156	1/620	1/611
#1-5	○ 東京観測波 100%	341	247	1/201	1/299
#1-7	ランダム波3軸 50gal	--	--	--	--
#2-2	○ 東京観測波 200%	455	220	1/121	1/227
#2-4	ランダム波3軸 50gal	--	--	--	--
#2-6	○ 東京観測波 300%	649	239	1/76	1/111
#2-8	ランダム波3軸 50gal	--	--	--	--
#3-2	○ 津島波 150%	757	47	1/59	1/119
#3-3	ランダム波3軸 50gal	--	--	--	--
#3-5	○ 津島波 300%	793	59	1/34	1/78
#3-6	ランダム波3軸 50gal	--	--	--	--

注) ○は地震波加振、地震波加振ケース#3-2、#3-5はX軸のみの入力

図4 地震加振時の最大応答分布図(X方向:観測値)

4.3 加振レベルによる固有振動特性変化

実験の各段階における試験体の振動特性を把握するため、実験ではランダム波加振(振幅: 40 cm/s^2 もしくは 50 cm/s^2)が行われている。このランダム波加振を用いて試験体の振動特性を周波数領域の解析により同定(カーブフィット)した。図5にX方向における1次から5次の固有振動特性の変化を示す。1次の固有振動数は、初

期(#1-2) 1.9Hz 程度であったものが最終加振後(#3-6)には0.84Hzと半分以下に低下している。高次モードについても同様な傾向にある。また減衰定数は、初期において1次が2%であったものが地震波加振の振幅が大きくなるにつれ、最終加振後には10.9%へと大きく上昇する傾向にある。さらに固有振動数における、1次から5次までの振動モード形状(R階:21F基準)の変化を調べた。図6には、各加振ケース前後でのX方向5次までのモード形状を重ね描いたものを示す。地震波加振(#1-5)で1/200の変形を経験した後のモード形状(#1-7)では、初期のモード形状(#1-2)から大きくモード形状の変化が見られ、これは固有振動数、減衰定数の変化と調和的である。その影響は高次モードほど強い傾向にある。とりわけ3次・4次モードの腹の位置の変化が大きい。

図5 地震加振後の固有振動特性の変化 (X方向:5次まで)

図6 地震加振後の固有振動モードの変化 (X方向:5次まで)

5. 応答推定手法の適用

5.1 応答推定の振動モデル

建物の地震応答推定には、振動モデルとして質量 m と剛性 k のパラメータが必要となる。ここでは、試験体の解析モデルと与えられている初期剛性パラメータを読み取り設定している⁸⁾。その振動モデルの固有値解析から求められる振動モード(刺激関数)を図7(1)に示す。1次の固有振動数は、1.77Hzで、前節で示したランダム波加振から得た試験体の固有振動数の1.89Hzと比べ、やや低振動数である。図7(2)には、レーリー減衰($h_1=2\%$, $h_2=2.5\%$)として与えた場合の振動モデルの伝達関数(21F/1F)を示す。この振動モデルを初期値として、少数センサの観測データを用いて「ベイズ更新」により振動モデルの剛性 k 分布を最適値に更新し、この更新モデルの固有モード(刺激関数)と観測データから建物全層の応答波形を推定する。考慮するモード次数は、観測のためのセンサ設置台数から1を減じた数までが計算の対象となる。つまり、4台のセンサ記録では、3次モードまでを考慮した応答推定をしている。

5.2 震動台実験データによる応答推定

本項では、縮小20層RC造建物試験体の長周期地震動による震動実験でのデータを用い、少数センサによる地震応答推定手法の適用性を評価する。評価には、表1の加振ケースのうち、地震波加振ケースを用いた。試験体には4点の加速度センサが1階、6階、13階、20階に、ほぼ均等配分で取り付けられているものとする。図8に、地震加振ケース#2-2(東京観測波200%)で推定した層間変位波形(1階、6階、9階、13階、16階、20階)を観測波形(破線: ORIG)、推定波形(実線: ESTM)で重ねて示す。両者の波形は、良く一致しており、応答推定を精度良く行うことができたことが確認できる。次に応答の推定精度を定量的に評価するため、 i 階の観測最大値 O_i (全階のセンサから求めた値)と推定最大値 E_i との関係を適合度 $Cr_i (=E_i / O_i)$ を用いて分析する。

図7 縮小20層RC造試験体の応答推定用の振動モデル

図8 層間変位波形の推定結果（#2-2, X方向）
（破線：観測波形，実線：推定波形）

地震波加振時の応答推定結果を最大加速度，最大層間変形，適合度の分布として図9から図14に示す。加振ケース#1-4は，弾性応答（最大層間変形角:1/620）の範囲にあり，最大加速度の分布は，観測値（Obsv: -o-）と推定値（Estm: -x-）は，ほぼ一致しており適合度（Acc: -△-）は1に近い。しかし，最大層間変形の分布では，観測値と推定値の適合度（Dis: -*-）のばらつきが上階階で大きく，適合度 Cr が0.6倍程度となっている階も見られる。また，弱非線形応答領域（最大層間変形角:1/201）に入る加振ケース#1-5では，最大加速度の分布は適合度が1に近く良い一致が見られるが，最大層間変形の分布は，弾性応答領域と同様にばらつきが大きい。

図9 応答推定結果（加振ケース#1-4，東京観測波 40%）

さらに加振入力が大きくなり，強非線形応答領域（最大層間変形角:1/121, 1/76）となる加振ケース#2-2, #2-6では，最大加速度の観測値と推定値の差が大きくなる。最大層間変形の分布における推定値の全体的傾向は，観測値を良く再現しているが，観測値のばらつきが大きい。さらに加振入力を上げた加振ケース（最大層間変形角:1/59, 1/34）#3-2, #3-5では，最大加速度の分布は，観測値と推定値の差は同じく大きい。最大層間変形の分布は，観測値のばらつきが相対的に小さくなるため，適合度が1に近づいている。

図10 応答推定結果（加振ケース#1-5，東京観測波 100%）

図11 応答推定結果（加振ケース#2-2，東京観測波 200%）

図12 応答推定結果（加振ケース#2-6，東京観測波 300%）

図 13 応答推定結果（加振ケース#3-2，津島波 150%）

図 14 応答推定結果（加振ケース#3-5，津島波 300%）

5.3 センサ台数の違いが応答推定に与える影響の確認

前項では、4 点のセンサにより地震波加振で評価した応答推定を実施して、最大値分布とその適合度を確認した。本項では、センサ台数の違いが応答推定の精度に与える影響を確認する。図 15 から図 17 に最大応答値の分布図（加速度，層間変形）で、センサ数が 3 点から 5 点までの応答推定結果を示す。これらの図は、図 4 で示した観測値の最大応答分布図と比較して見ることができる。応答推定結果から、センサ 3 点（図 15）では、最大層間変形が表れる階の位置が観測値（図 4）と大きく異なっている。これは応答推定では、センサ点数で制限される 2 次モードまでの応答しか考慮していないため、実現象の高次モードの影響が反映されていないためと思われる。4 点以上のケースでは、最大の層間変形が表れる階の位置をおおむね特定できており、今回の条件下では 3 次モードまで考慮することで応答推定の精度を高めることが可能であると判断する。

図 18 から図 20 にセンサ台数の違いによる応答推定について、地震加振ケース毎に層間変形での加速度および層間変形の最大値について適合度 Cr を求め、精度について確認を行う。結果は、各層の適合度 Cr を全層データとしてまとめ、それを箱ひげ図を用いて示す。それぞれ横軸を地震波加振ケースで表し、縦軸にその適合度を示す。箱ひげ図は、四分位を用いてデータの散らばりをグラフで表しており、第 1 四分位点から第 3 四分位点までの高さに箱を描き、中央値で仕切りを描いている。結果では、センサ台数の影響を適合度で比

較した場合、箱ひげ図から得られた第 1・第 3 四分位点の範囲（50% ばらつき範囲）は、ほぼ同様な傾向であり、推定精度の優劣は見られなかった。しかしながらセンサ数としては、前節で示したように 4 点以上のケースでは、ほぼ最大の層間変形が表れる階の位置を推定できていることを考慮して、振動モードが 3 次モードまで考慮できる 4 点での応答推定が優位であろうと考える。このようにすることで必要最小限のセンサにより、実用上十分な精度のモニタリングが可能となる。

図 15 応答推定結果（センサ 3 点，2 次モードまで考慮）

図 16 応答推定結果（センサ 4 点，3 次モードまで考慮）

図 17 応答推定結果（センサ 5 点，4 次モードまで考慮）

図 18 3 点のセンサによる応答推定結果の適合度（箱ひげ図）

図 19 4 点のセンサによる応答推定結果の適合度（箱ひげ図）

図 20 5 点のセンサによる応答推定結果の適合度（箱ひげ図）

6. まとめ

E-ディフェンスの大型震動台によって実施された「縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験」データを用いて、少数センサによる地震応答推定手法を適用した。本手法はバイズ更新により初期の建物モデルを修正することにより、建物の振動特性の変化にも対応しており、本報告では試験体の特性が変化する損傷前後のデータを用いて手法の検証を行った。

少数センサによる地震応答推定手法によって推定される最大層間変形角は、1/100 を超える強非線形領域までの建物全層の地震時応答を実用的に精度良く推定を行うことができることが確認できた。また少数センサによる地震応答推定手法で用いるセンサの台数は、4 台（ほぼ均等配置）以上とすることにより、加速度、層間変形の応答推定の精度に与える影響を小さくできることが確認できた。

謝辞

本研究に利用した震動台実験データは、国交省・建築基準整備促進事業「長周期地震動に対する RC 造建築物の安全性検証方法の検討」において平成 24 年度に E-Defense で実施された「縮小 20 層 RC 造建築試験体の長周期地震動による震動実験」によるものである。データは、国立研究開発法人防災科学技術研究所「ASEBI」にて公開されているものを利用して頂いた。ここに記して関係者に謝意を表します。

参考文献

- 岡田敬一，森井雄史，佐々木仁志：“地震時における建物の健全性判定支援システム－安震モニタリング SP の技術開発について－”，（一財）日本建築総合試験所，機関誌 GBRC 164 号（Vol. 41 No. 2），pp. 11-22，2016. 4
- 岡田敬一，森井雄史，白石理人，杉本浩一：“RC 造 6 層建物試験体の大型振動台実験における地震時建物健全性判定支援システムの適用”，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），pp. 1025-1026，2016. 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，pp. 61-70，2013. 1
- 杉本訓祥，増田安彦ほか：“縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 その 1 計画概要と試験体”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 653-654，2013. 8
- 勝俣英雄，杉本訓祥ほか：“縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 その 2 入力地震動の計画と加震制御”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 655-656，2013. 8
- 洪市克彦，栗田康平ほか：“縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 その 3 震動実験結果：試験体の損傷状況”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 657-658，2013. 8
- 穴吹拓也，佐野剛志ほか：“縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 その 4 各層の応答性状”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 659-660，2013. 8
- 福本義之，片岡大ほか：“縮小 20 層 RC 造建物試験体の長周期地震動による震動実験 その 7 標準設計手法による解析”，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp. 665-666，2013. 8
- 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，pp. 461-464，2013. 6
- 岡田敬一，片岡俊一：“2 ヶ所に設置したセンサによる地震記録を用いた建物全層応答推定手法の適用”，日本地震工学会論文集，第 16 巻，第 3 号（特集号），pp. 38-54，2016. 3
- 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. 4

[2016 年 6 月 1 日原稿受理 2016 年 7 月 29 日採用決定]