

建物の安全性即時診断システムの開発

森下 真行^{*1}・齊藤 芳人^{*1}・龍神 弘明^{*1}

Development of Instant Diagnostic System for Building Safety

Tadayuki MORISHITA, Yoshihito SAITO, Hiroaki RYUJIN

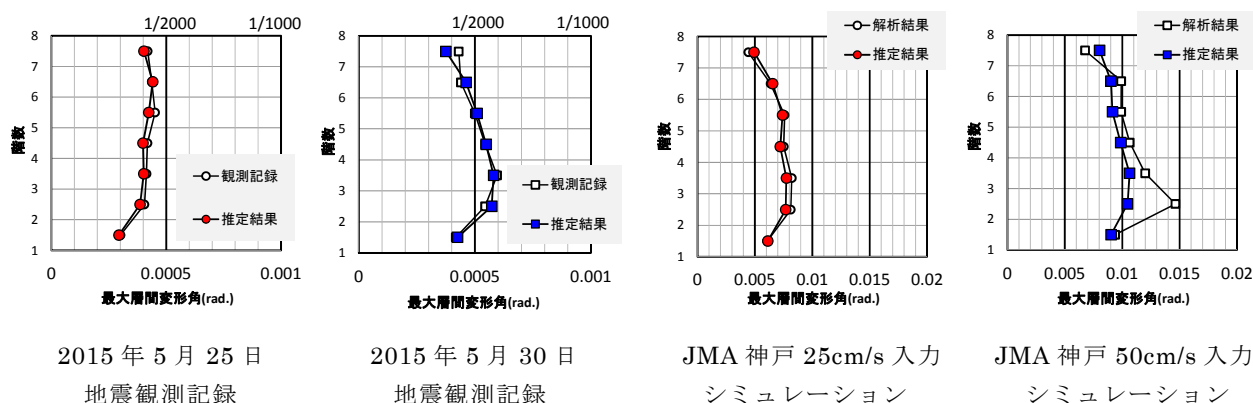


図-1 最大層間変形角の比較

研究の目的

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震では、建物管理者が建物の継続利用の可否判断に迷うなどの理由から、建物の安全性が確認できるまで建物を使用禁止とする事例が報告されている。このような背景を受け、建物を応急的に継続利用可能か否か、すなわち例えば構造的に安全か否かを、地震直後に診断可能なシステムの必要性が提言されている。しかしながら、コスト的な課題もあり、現時点でその適用は限定されている。

本報は、コスト面での課題に対して、屋上階1ヶ所という必要最小限の地震計情報から建物の安全性を診断するシステムを提案し、提案手法の妥当性を検証することを目的とする。

技術の説明

屋上階1ヶ所のみ地震計で計測した建物の揺れを解析し、建物各階の応答を推定する技術である。まず、屋上階での観測記録に対して、建物の1階に対する屋上階の複素数領域での伝達関数の推定値を適用して1階の入力波を推定する。次いで、モード毎に求めた1階に対するR.F.の相対加速度に対して振動モード形状の推定値を適用して、各階での絶対加速度応答ならびにその2階積分により絶対変位を求める。最終的に、上下層での絶対変位の差分を階高で除することにより層間変形角を得る。

概ね整形な平面形状の鉄骨造事務所ビルでの地震観測およびシミュレーションによる各階の応答と、本提案手法による各階での応答推定値とを比較することで、提案手法の妥当性を検証する。

主な結論

屋上階の加速度記録のみから建物の安全性を診断するシステムを提案し、提案手法の妥当性を検証した結果、以下の結論を得た。

- ・地震時の実建物での観測記録との比較により、本提案手法の推定精度を把握した結果、十分実用的であることが確認された。
- ・シミュレーション結果との比較により、建物の層間変形角 $1/100\text{rad}$ 程度以内の範囲において、最大層間変形角は概ね対応した推定結果が得られることが確認され、実用的であることが示された。

^{*1} 本店 技術研究所 防災・構造研究室

建物の安全性即時診断システムの開発

森 下 真 行^{*1} 龍 神 弘 明^{*1}
齊 藤 芳 人^{*1}

要 旨

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震では、建物管理者等が建物の継続利用の可否判断に迷うなどの理由から、建物の安全性が確認できるまで建物を使用禁止とした事例が報告されている。このような背景を受け、建物の構造安全性などを地震直後に診断可能なシステムの必要性が提言されている。

そこで、屋上階での観測記録に対して、建物の1階に対する屋上階の伝達関数ならびに建物の振動モード形状を適用して推定した各層での絶対加速度応答ならびに層間変形角から、建物の安全性を診断するシステムを開発した。本報では、本システムで採用した手法による推定結果と地震観測記録ならびにシミュレーション結果との比較を通じて、本提案手法の妥当性を検証する。以下に得られた結論を示す。

- ・地震時の実建物での観測記録との比較により、本提案手法の推定精度を把握した結果、十分実用的であることが確認された。
- ・シミュレーション結果との比較により、建物の層間変形角 $1/100\text{rad}$. 程度以内の範囲において、最大層間変形角は概ね対応した結果が得られることが確認され、実用的であることが示された。

キーワード 構造ヘルスマモニタリング／伝達関数／振動モード／最大加速度／最大層間変形角

目 次

- | | |
|--------------|------------------|
| 1. はじめに | 4. 観測記録による検証 |
| 2. 提案手法の概要 | 5. シミュレーションによる検証 |
| 3. 比較検証建物の概要 | 6. まとめ |

DEVELOPMENT OF INSTANT DIAGNOSTIC SYSTEM FOR BUILDING SAFETY

Tadayuki MORISHITA Hiroaki RYUJIN
Yoshihito SAITO

Synopsis:

Many cases of unsuccessful decision for building safety evaluation were reported after the disaster of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. Taking into account of these cases, necessity of the diagnostic system for building safety is suggested.

The authors propose an instant diagnostic system by using estimation method for the absolute acceleration of each layer from an observation record at a penthouse with the transfer function and standard vibrational mode shapes.

As the results of the validation of this proposed method, the followings were obtained.

- (1) By comparison with the earthquake observation records, it was confirmed that this proposed method is enough practical.
- (2) By comparison with the simulation results, it was confirmed that this proposed method is practical when story drift is within about $1/100$ -radians.

* 1 本店 技術研究所 防災・構造研究室

1. はじめに

平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震では、過去に経験したことの無い揺れを体感したことにより、建物使用者の不安感の増大や建物管理者が継続利用の可否判断に迷うなどの理由から、建物の安全性が確認できるまで建物を使用禁止とした事例が報告されている。建物の危険度を応急的に判定する仕組みとして、建築の専門家による応急危険度判定¹⁾という制度が構築・運用されている。しかしながら、被災直後においては初動対応の観点から、例えば建物管理者が建物の危険度を独自に判断せざるを得ない状況にある。このような背景を受け、建物の応急的な使用性判断、すなわち例えば構造的に安全か否かを地震計による記録を利用して即時診断する、いわゆる構造ヘルスマニタリングシステムの活用が提言されている^{2),3)}。一方で、このようなシステムに関する技術開発が積極的に行われているが、コスト的な課題もあり現時点でその適用は一部の比較的大規模な建物に限定されている。コスト面での課題に対して、品川らは、建物頂部の加速度センサのみの情報から、建物の各層での最大層間変形角を推定する手法を提案している³⁾。この手法は、最小のコスト（加速度センサの設置は建物頂部のみ）で、比較的精度良い診断結果が得られる点に特徴を有する。

本論では、品川らが提案している 1 台の加速度センサのみから構造安全性を診断するという特徴は踏襲しつつ、1 階での入力波の推定方法に複素数領域での伝達関数を適用するとともに、建屋の振動モードとして、適切な次数に相当する振動成分を考慮することで、最大層間変形角の推定に留まらず、各層の最大加速度まで推定可能なシステムを提案する。次いで、概ね整形な平面形状の鉄骨造事務所ビルにおける地震観測記録ならびに当該建物を対象としたシミュレーション結果との比較を通じて、本提案手法の妥当性を検証する。

2. 提案手法の概要

建物頂部で得られた加速度記録（以下、RF 観測波と呼ぶ）から、各階の絶対加速度応答および層間変形角を推定する手法（図-1 参照）について述べる。

検討に際しての前提条件として、対象建物の構造種別、階数ならびに各階高に関する情報のみ既知であるとする。各検討段階で、建物の構造計算から求めた振動モデルを利用した手法も考えられるが、振動モデルが存在するのは高層建物などごく一部の物件に限られており、都度振動モデルを構築する必要が生じる。そこで、汎用性を持たせる点で振動モデルの利用は課題が残ると判断し、振動モデルは利用しないことを前提とした。

Step1（固有振動数の推定）

RF 観測波に対して周波数分析を適用し、各次数の卓越振動数を推定する。なお、本提案手法では、RF 観測波か



図-1 RF 観測波から各階の応答を推定する手法

ら推定された卓越振動数は建物の固有振動数に一致すると判断する。

Step2（振動モード形状と刺激係数の設定）

Step1 で推定された各次の固有振動数をもとに、振動モード形状と刺激係数を設定する。ここで、振動モード形状と刺激係数は、階数分の自由度を持つ質点系モデルの固有値解析より求める。本提案手法では、振動モデルを利用しない方針であるため、各質点の質量および剛性を別途設定する必要が生じる。そこで、本提案手法では以下の簡易手法を採用する。各質点の質量は、最下層を 1、階数が 1 上がるごとに 1%の比率で質量が低減されていく、また RF は設備機器等の影響により 1%減で求めた層質量の 50%増を見込む、との仮定の下で、1 層に対する相対的な質量比として設定する。これは、建物の柱および梁は上階ほどその断面積がスリム化される傾向を加味した結果である。実際には、構造設計方針や積載荷重により各層の質量は変化するため一律減少する訳ではないが、その正確な値を設定することは現実的には非常に困難である。そこで、本提案手法では、簡便化を図る意味で、上記簡易手法を採用することとした。

各質点の剛性は、地震層せん断力分布係数（以下、Ai 分布と呼ぶ）を基に設定した初期値から最適値を探索する方法を採用する。具体的には、先に設定した各質点の質量を基に求めた Ai 分布による各層のせん断力を、最下層の値で基準化した値（最下層（=1）に対する相対比率で、各層の剛性を表現）を各層の剛性初期値とする。以上の方法で求めた質量および剛性から求まる質量マトリクスならびに剛性マトリクスを用いて固有値解析を行う。固有値解析は、各層の質量および最下層の剛性は固

定とし、最上層を除く各層の剛性を初期値 $\pm 10\%$ の範囲内で増減させた複数の組合せについて行う。最上層は、他の層とは境界条件が異なるなど特殊であると判断し、変動幅を他層の倍の $\pm 20\%$ の範囲内で増減させることとした。以上のように設定した質量および剛性を用いて、繰り返し計算により最適解を求めることとなる。なお、最適解選定時の適合判定条件は、一般には低次のモード次数ほど刺激係数の絶対値は大きくなる性質を考慮し、各次の刺激係数の絶対値を重み付係数として採用する。最終的な評価関数(C)は、1 次の固有振動数に対する 2 次以上の固有振動数の比に刺激係数による重み付係数を掛けあわせた後に、検討の上限次数までを二乗和したものとなり、この評価値が最も小さくなる質量と剛性の組合せを選定することとなる。選定された質量と剛性の組合せによる固有値解析結果から、最上層を 1 に基準化した振動モード形状と刺激係数が得られる。

$$C = \min \left(\sum_{i=2}^n \left(\left(\frac{fa_i}{fa_1} - \frac{fm_i}{fm_1} \right) \cdot \beta a_i \right)^2 \right) \quad [1]$$

ここに、

C : 評価関数

fa_i : 推定された i 次の固有振動数 (Hz)

fm_i : RF 観測波より推定された i 次の固有振動数 (Hz)

βa_i : 推定された i 次の刺激係数

n : モード次数の上限値

Step3 (伝達関数の設定)

RF の 1F に対する伝達関数を、複素数領域での多自由度の伝達関数として設定する。伝達関数は、Step1 で推定された各次の固有振動数と減衰定数とから求まる各次数単独での伝達関数に、Step2 で得られている刺激係数を掛け合せて上で、多自由度に展開した複素数領域での伝達関数とする。なお、本提案手法で考慮すべきモード次数の上限値は、Step1 で推定された次数もしくは Step2 で得られている刺激係数を 1 次から順次足しあわせた値が 1.0 ± 0.1 以内に収まる次数のうちどちらか低い方のモード次数とする。

各次数の伝達関数設定時に用いる減衰定数は、日本建築学会の「建築物の減衰」⁵⁾を参考に設定する方針とする。本報では、1 次モードに対して鉄骨造建物設計時の慣用値である 2%を採用した。高次モードでの減衰定数の分布に関しては、同文献によれば、剛性比例型と減衰定数一定型との中間的な傾向を示すと示唆されている。減衰定数と伝達関数とは、減衰定数を大きく設定するほど伝達関数の応答倍率は小さくなる関係にある。伝達関数の応答倍率が小さくなるほど 1F 入力波の振幅は大きく推定され、結果的に RF と 1F との相対量は小さくなる。本報では、層間変形の推定に影響を与える相対変形が過小評価されるのを避けるため、減衰定数一定型を採用することとし

た。また、各モード単独での伝達関数で考慮すべき振動数範囲は、モード次数によらず以下の振動数範囲とする。下限振動数は、後に示す積分処理を考慮して、本報では 0.3Hz に設定した。また、上限振動数は、設定された多自由度の伝達関数の高振動数側における大きさが 1 となる振動数とした。

Step4 (1F 入力波の推定)

RF 観測波の周波数分析結果に、Step3 で設定された多自由度の伝達関数の逆数を複素数領域で掛けあわせ、波形に戻すことにより、1F 入力波を推定する。

Step5 (RF 観測波のモード分解)

RF 観測波の周波数分析結果に、Step3 で設定された多自由度の伝達関数に対する各モードの伝達関数の絶対値の比を掛けあわせ、波形に戻すことで、各モードの波（以下、RF モード別波形と呼ぶ）に分離する。

Step6 (各階での絶対加速度応答の推定)

RF モード別波形と 1F 入力波との差分（相対加速度）に、Step2 で設定した振動モード形状を掛けあわせることにより、各階のモード毎の相対加速度が得られる。モード毎の相対加速度と 1F 入力波を各階ですべて足し合わせるにより、各階の絶対加速度応答が推定される。

Step7 (層間変形角の推定)

Step6 で推定された各階の絶対加速度応答を周波数領域で 2 階積分して絶対変位を求め、連続する上下階間でその差分を取るにより層間変形が得られる。得られた層間変形を各階高で除することにより層間変形角が求まる。

3. 比較検証建物の概要

図-2 に検討対象とした建物および地震観測の概要を示す。当該建物は、東京都に建つ 2014 年竣工の杭基礎を持つ鉄骨造地上 7 階建（軒高 28.2m、基準階高 3.9m）の事務所ビルであり、概ね整形な平面形状（33.1m×17.8m）をしている。竣工時より、屋上階を含めた全階で MEMS(Micro Electro Mechanical System)式加速度センサにより地震観測を実施しており、RF 設置の加速度センサが所定のトリガレベルを超えた場合に全階の加速度応答が自動的に収録される仕様としている。

4. 観測記録による検証

ここでは、観測記録との比較により、本提案手法の妥当性を検証する。

4.1 検討対象とした観測地震諸元

表-1 に検討対象とした観測地震の諸元および地震観測結果を示す。検討対象は、2015 年 5 月 25 日の埼玉県北部を震源地とする地震（地震 No.1）および 2015 年 5 月 30 日の小笠原諸島西方沖を震源地とする地震（地震 No.2）で得られた記録とした。前者は直下型に分類される地震、

後者は海洋型に分類される地震であり、特徴の異なる 2 地震に対して検証を実施した。

これら地震では、最寄りの気象庁震度観測点にて、前者は震度 3、後者は震度 4 と公表されており、当該建屋 1F での観測記録より求めた計測震度は両地震とも 3.6 (震度 4) であった。また、1 階では両地震とも 40cm/s^2 程度、RF では 60 から 90cm/s^2 程度の最大加速度が記録されている。本報では、1F での最大加速度が大きくなる X (短辺) 方向を検討対象として選定している。

4.2 推定された固有振動数の確認

ここでは、Step1 で推定された固有振動数について確認する。表-2 に地震観測記録より推定した固有振動数の比較を示す。ここで固有振動数は、RF 観測記録の周波数分析結果より求めた値と RF と 1F での観測記録から求めた伝達関数を利用して求めた値を併記している。1 次の固有振動数については、両地震とも 1% 程度の差に収まっていることが分かる。2 次および 3 次の固有振動数に関しては、1 次の固有振動数ほど精度よい推定値ではないものの最大で 5% 程度の差に収まっていること、3 次モードの比率が最も悪いことが確認できる。一般に、高次のモードほど減衰定数が大きくかつ刺激係数が小さくなるため、RF 観測記録に対する周波数分析より得られる振幅値は相対的に小さくなる傾向にあり、固有振動数の精度ある推定が困難となる場合が多い。また、RF 観測記録から求めた固有振動数は、入力周波数特性を含んだ形で評価されているなどの複数の誤差要因を含んでおり、推定結果の信頼性は高次のモードほど低下する可能性が高いと思われる。本提案手法で求めた固有振動数と観測記録の伝達関数より求めた値との差は最大で 5% 程度であり、この差を許容すると判断し、3 次モードを実測結果から推定される検討の上限次数と設定した。なお、4 次モード以降の固有振動数に関しては、本報で検討対象とした RF 観測記録の周波数分析結果に明確なピークが確認できなかったため、特定不能と判断した。

4.3 振動モード形状の比較

図-3 に地震 No.1 に対して本提案手法 (検討 Step2 に該当) を適用して推定された振動モード形状を、本検討建物で別途実施した起振試験結果ならびに常時微動より求めた結果とともに示す。起振試験は建屋水平方向に対して実施し、屋上階に設置した起振器を加速度一定の下で周波数のみ連続的に変化させて起振する方法とした。地震観測用の振動センサで収録された建屋起振時の振動記録に対して、各層での共振振動数成分の振幅値を RF 振幅値で除して基準化するとともに、RF 記録との位相差を考慮して振動モード形状を求めた。

常時微動に関しては、1 日 3 分間の微動記録 10 日分を周波数領域で平均処理したデータに対して、起振試験と

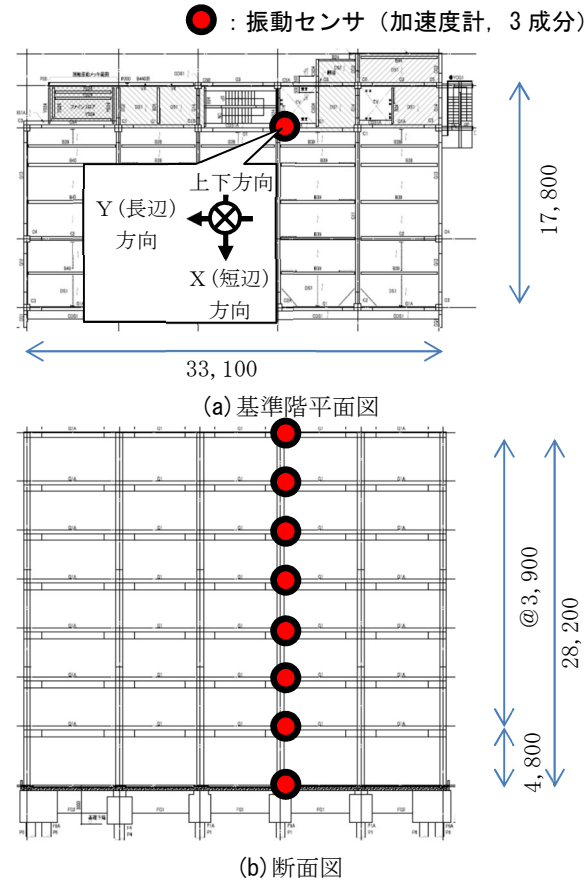


図-2 検討対象とした建物および地震観測の概要

表-1 検討対象とした観測地震の諸元

地震 No.	1		2	
地震の発生日時	2015/5/25 14 : 28		2015/5/30 20 : 23	
震央位置	埼玉県北部		小笠原諸島西方沖	
震源深さ	56 (km)		682 (km)	
マグニチュード	5.5		8.1	
震央距離	40 (km)		877 (km)	
気象庁震度※1	3		4	
計測震度※2	3.6		3.6	
最大加速度 (cm/s ²)	X 方向 (短辺)	Y 方向 (長辺)	X 方向 (短辺)	Y 方向 (長辺)
R F	78.2	84.6	62.2	92.9
1 F	42.2	33.8	35.7	34.3

※1: 最寄りの気象庁観測点公表値

※2: 1 階観測記録より計算

表-2 固有振動数の比較

次数	地震 No. 1			地震 No. 2		
	① RF 単独 記録	② 観測記録 (伝達関数)	比率 ①/②	① RF 単独 記録	② 観測記録 (伝達関数)	比率 ①/②
1	1.03	1.02	1.01	1.03	1.01	1.01
2	3.22	3.23	1.00	2.98	3.11	0.96
3	6.30	6.48	0.97	6.02	6.33	0.95
4	(特定不能)			(特定不能)		

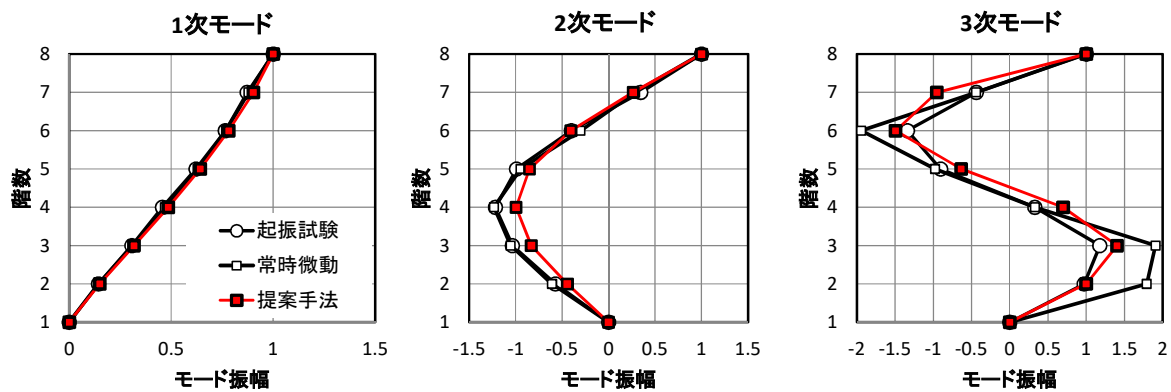


図-3 本提案手法により推定された振動モード形状（地震 No.1）

同様の方法で振動モード形状を求めた。なお、本提案手法により求めた刺激係数は 3 次モードまでの和で 1.0 ± 0.1 以内に収まるため、3 次モードを検討上限次数と設定した。

本提案手法による 1 次の振動モード形状は、起振試験ならびに常時微動より推定した値と良く対応することが確認できる。2 次モードに関しては、本提案手法による振動モード形状はモードの腹近傍で他の手法によるものと比較してやや小さめに推定されているものの、全体の傾向はよく捉えられている。3 次モードに関しては、3 手法ともに若干の差異が認められるものの、概ね同様の傾向を示していることが確認できる。起振試験ならびに常時微動より求めた振動モード形状は微小振幅時の結果であり、本提案手法により推定された地震時の振動モード形状と完全に対応するものではないが、3 手法ともに同様の傾向を示す点から概ね特性は捉えられていると考えられる。なお、本提案手法により推定された地震 No.2 での振動モード形状は、地震 No.1 と概ね同様の結果が得られていることを確認している。

4.4 1F 入力波の比較

図-4 に本提案手法により推定された 1F に対する RF の伝達関数を、観測記録の分析結果とともに示す。1 次および 2 次の固有振動数に関しては、応答倍率（図-4 上段）による卓越振動数は良く対応しており、位相差（図-4 下段）もよく対応していることが確認できる。3 次の固有振動数に関しては位相差に若干のずれが確認できるものの、全体的には表-2 に示す通り良い対応を示している。固有振動数成分での応答倍率は、1 次で若干大きく設定されているが、2 次、3 次の成分を含め全体的な傾向は概ね対応している。これらの点は、3 次の固有振動数の推定誤差を許容可能と判断した先の結果を裏付けるものである。

図-5 に推定された 1F 入力波を、観測記録とともに示す。推定された 1F 入力波は、観測記録と振幅および位相ともに概ね対応していることが確認できる。以上より、伝達関数を利用して RF 観測波から 1F 入力波を推定する本提案手法は、実現象を概ね再現可能であると判断できる。

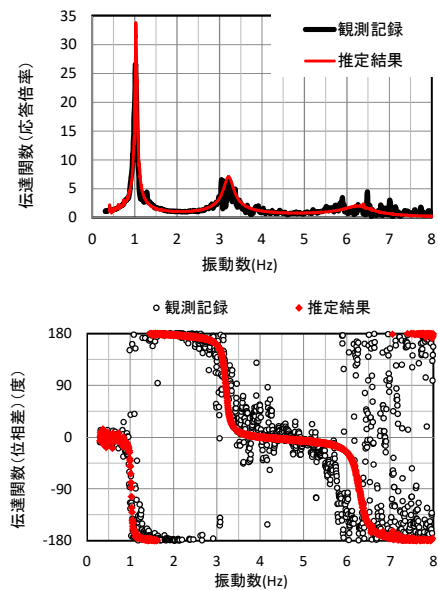
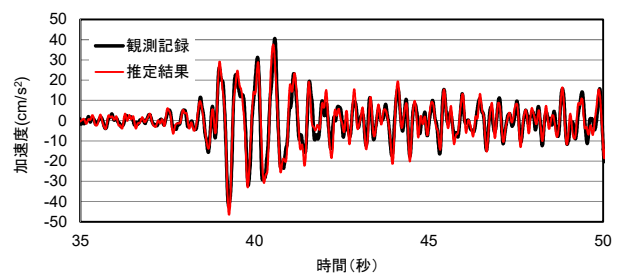
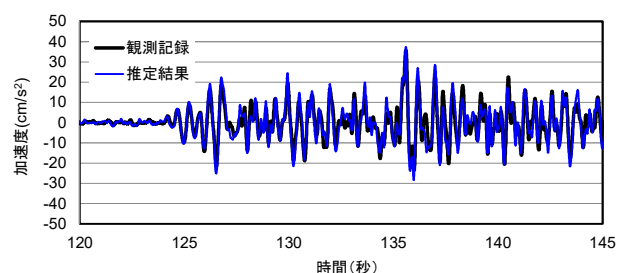


図-4 本提案手法による伝達関数（地震 No.1）



(a) 地震 No.1



(b) 地震 No.2

図-5 本提案手法による 1F 入力波

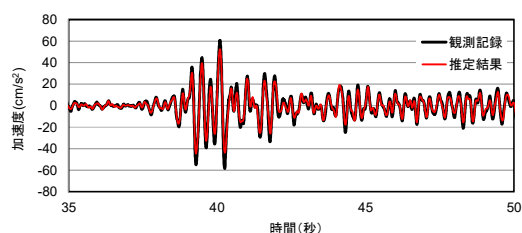
4.5 実地震記録による診断精度の検証

図-6 および図-7 に本提案手法により推定された中間階での絶対加速度応答および層間変形を、観測記録とともに示す。なお、中間階での比較は、2次モードおよび3次モードともに振動モード形状の腹付近に位置する3階（層間変形は2階との相対量）での各応答波形とした。両地震ともに、本提案手法による推定結果は、観測記録と良く対応していることが確認できる。

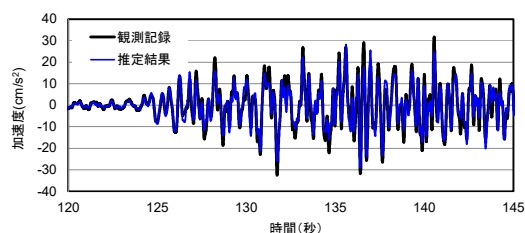
図-8 および図-9 に本提案手法および観測記録より求めた最大加速度および最大層間変形角の建物高さ方向での分布を、図-10 に最大加速度および最大層間変形角の観測記録に対する誤差率を示す。各最大値は、一部の層でやや小さめの評価となるものの、地震によって異なる建物応答の特性の違いなど、本提案手法による結果は観測記

録をよく表現できていると考えられる。観測記録に対する誤差率について、最大加速度は両地震とも13%以内に収まっており、概ね良い対応を示すことが確認できた。最大層間変形角の比較では、地震No.1は誤差率6%以内に収まっているが、地震No.2では最大14%の誤差を含み、両地震で誤差率に差の生じる結果となった。ただし、14%の誤差となる最上層以外は地震No.1と同程度の誤差範囲に収まっていることより、最大層間変形角についても概ね良い対応を示すと判断可能である。

以上より、本提案手法による評価結果は、入力最大加速度で 40cm/s^2 程度、最大層間変形角で $1/2000\text{rad}$ 程度の地震での応答に対してではあるが、地震直後の応急的な安全性診断技術として十分実用的な精度を有することが確認された。

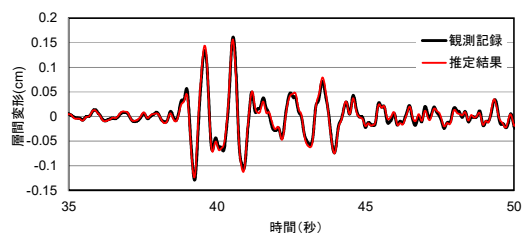


(a) 地震 No.1

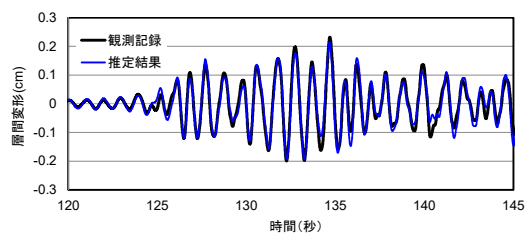


(b) 地震 No.2

図-6 3階での絶対加速度応答

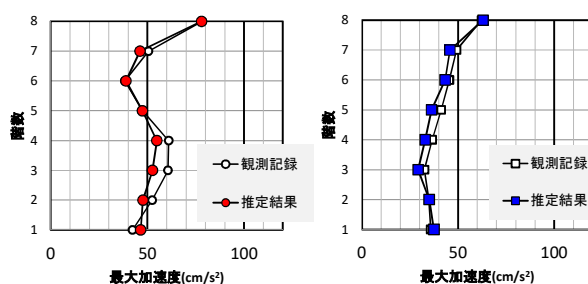


(a) 地震 No.1



(b) 地震 No.2

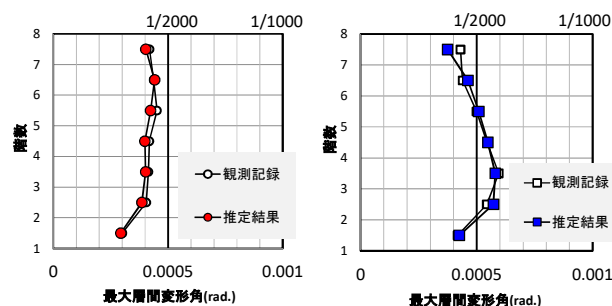
図-7 3階での層間変形



(a) 地震 No.1 (5/25)

(b) 地震 No.2 (5/30)

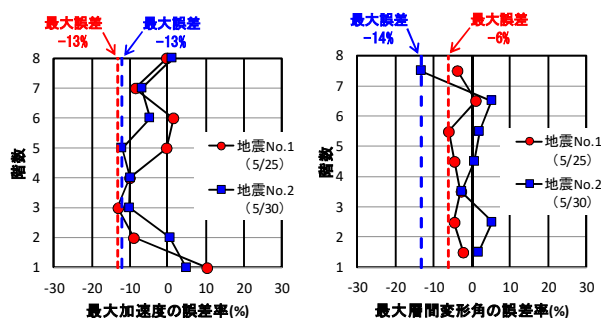
図-8 最大加速度の建物の高さ方向分布



(a) 地震 No.1 (5/25)

(b) 地震 No.2 (5/30)

図-9 最大層間変形角の建物の高さ方向分布



(a) 最大加速度

(b) 最大層間変形角

図-10 最大応答推定値の誤差分布

5. シミュレーションによる検証

5.1 シミュレーションの概要

前章で、本提案手法の妥当性について観測記録をもとに検証を実施し、全体の傾向はよく捉えられており十分実用的である、との結論を得た。しかしながら、検討対象としたのは震度 4 の地震に対してである。よってここでは、構造躯体が非線形的な挙動を示す場合の本提案手法の妥当性を、提案手法による推定値と振動モデルを用いた振動シミュレーションによる計算値との比較により検証する。

シミュレーションの対象建物は前章までで検討対象とした建物と同一とし、1 階床レベルを固定、2 階以上の各階を 1 質点に集約した等価せん断型の 7 質点モデルに対して行う。検討対象は短辺方向とし、減衰定数は 1 次モードで 2% の瞬間剛性比例型とした。図-11 にシミュレーションモデルに採用した復元力特性を示す。復元力特性には標準トリニアモデルを、入力波には JMA 神戸 (1995) NS 成分を 25cm/s および 50cm/s に基準化して用いた。なお、図-11 には上記両入力に対する各層の最大応答点を併記している。

5.2 シミュレーション結果

図-12 に本提案手法で推定された 3 階での絶対加速度応答を、図-13 に層間変形を、シミュレーションで得られている各質点での応答波形とともに示す。比較は、前章同様に 3 階とした。絶対加速度応答および層間変形ともに、波形としての特性は良く捉えられている。しかしながら、両波形とも、最大値の評価点で過小評価となる傾向にあることが分かる。

図-14 および図-15 に本提案手法およびシミュレーション結果より求めた最大加速度および最大層間変形角の建物高さ方向での分布を、図-16 に最大加速度および最大層間変形角のシミュレーション結果に対する誤差率を示す。最大加速度について、25cm/s 入力時の比較では、下層でやや小さめの評価となるものの、上層は良く対応しており、また全体的な分布性状は概ね捉えられていることが確認できる。50cm/s 入力時の比較では、25cm/s 時に比較して 1 階入力波の差が顕著であり、1 階での両者の誤差率は 30% となる。本提案手法では、上部構造の応答振幅に関係なく減衰定数は 2% の一定型を採用しており、非線形領域での履歴減衰等は考慮していない。すなわち、上部構造での履歴減衰が見込まれる振幅領域での応答に対しても初期に設定した減衰定数のままで評価が行われる。したがって、1F 入力波の最大加速度が小さく推定されたものと考えられる。この点は、本提案手法で採用する減衰定数を、上部構造での応答振幅の大小に併せて変化させるなどにより改善の余地があると考えられる。今後は、他の建物を含めたより振幅の大きな実測結果を基に、最適な減衰定数の簡易設定についても検討する予定である。

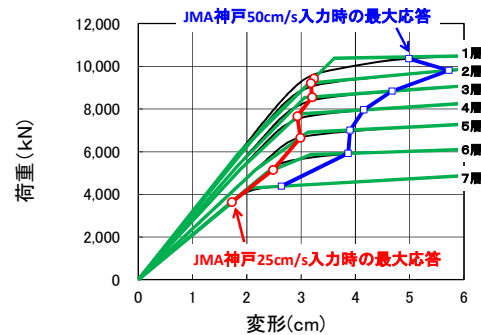
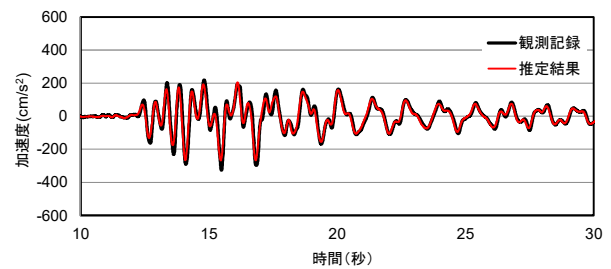
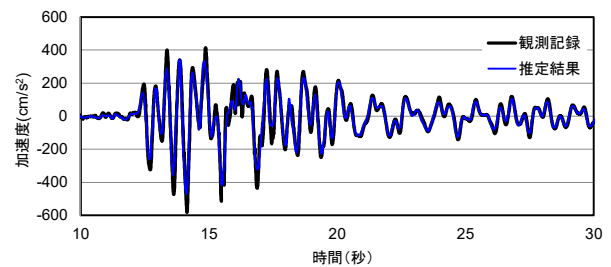


図-11 シミュレーションモデルに用いた復元力特性

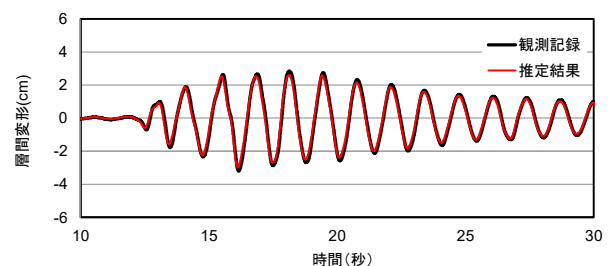


(a) JMA 神戸 25cm/s 入力時

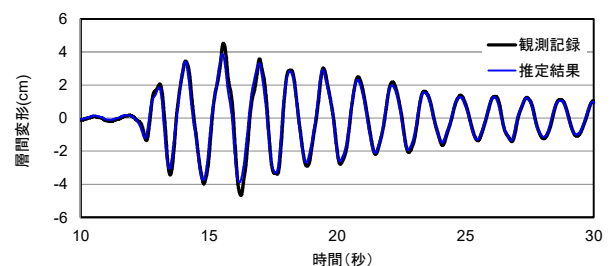


(b) JMA 神戸 50cm/s 入力時

図-12 3 階での絶対加速度応答



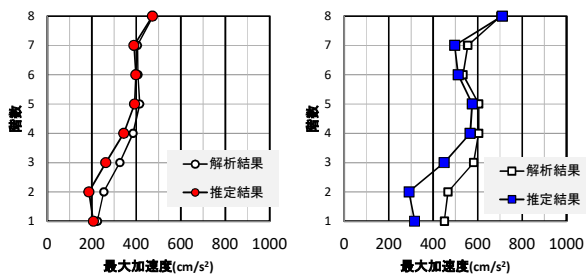
(a) JMA 神戸 25cm/s 入力時



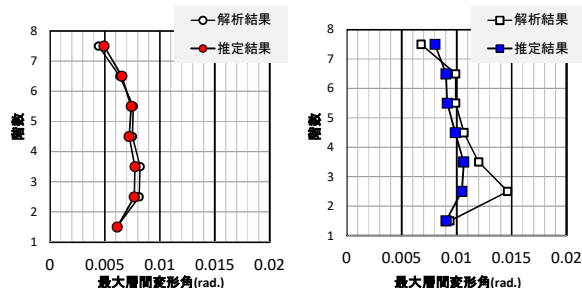
(b) JMA 神戸 50cm/s 入力時

図-13 3 階での層間変形

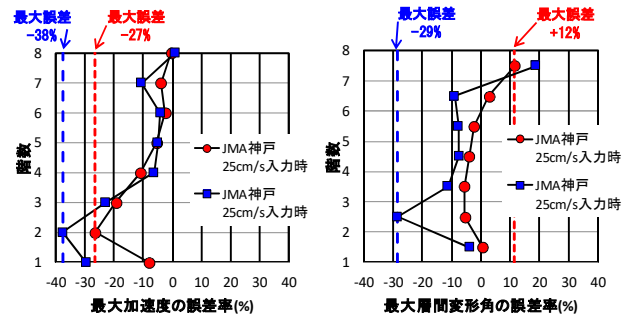
最大層間変形角について、25cm/s 入力時の比較では、提案手法による結果はシミュレーション結果の分布特性を良く捉えられているとともに、両者の誤差率も $\pm 12\%$ 以内に収まっていることが確認でき、地震直後の応急的な安全性診断技術として実用的な精度を有することが確認できた。なお、25cm/s 入力時の層間変形は、シミュレーションで設定した復元力特性において、一部の層で第二折点付近まで応答する状態（図-11 参照）に相当する。50cm/s 入力の場合には、シミュレーション結果において層間変形角が相対的に大きくなる 3 階において両者に特に顕著な差が発生していることが確認できる。本シミュレーション結果のような特定層の層間変形のみ大きくなる状況が想定される場合には、弾性理論を基にした本提案手法の推定精度が低下することを示唆する結果である。このように特定層のみの変形が相対的に大きくなる現象は、層間変形が復元力特性の第 2 折点を大幅に超えるような変形領域で顕著になると推測される。なお、層間変形角 $1/100\text{rad}$ 程度を示す他の階では両者は概ね対応していることから、層間変形角 $1/100\text{rad}$ 程度が本提案手法の適用限界の目安となる可能性が考えられる。本提案手法の適用限界に関しては、減衰定数の設定法など設定条件の改良に伴う推定精度の改善検討とともに、他の入力に対する検討を踏まえ明確にする必要があり、今後の検討課題としたい。



(a) JMA 神戸 25cm/s 入力時 (b) JMA 神戸 50cm/s 入力時
図-14 最大加速度の建物の高さ方向分布



(a) JMA 神戸 25cm/s 入力時 (b) JMA 神戸 50cm/s 入力時
図-15 最大層間変形角の建物の高さ方向分布



(a) 最大加速度 (b) 最大層間変形角
図-16 最大応答推定値の誤差分布

6. まとめ

地震直後の建物の安全性を即時診断するシステムとして、建物頂部の加速度記録のみから各階の絶対加速度応答および層間変形角を推定する手法を提案した。概ね整形な平面形状の鉄骨造事務所ビルにおける実地震震時の観測記録との比較により、本提案手法の推定精度を把握した結果、十分実用的であることが確認された。また、シミュレーション結果との比較により、建物の最大層間変形角 $1/100\text{rad}$ 程度以内の範囲においては実用的な最大層間変形角の推定結果が得られることを確認した。なお、 $1/100\text{rad}$ を超える変形領域では推定精度が低下する傾向にあることから、本提案手法の適用限界とも考えられる。今後も継続して、提案手法の改善による推定精度の向上ならびに適用限界の把握等に努める予定である。

謝辞：本システムの開発では、慶應義塾大学 三田彰教授の御指導を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針，2005. 12.
- 2) 日本建築学会：建築の原点に立ち返る-暮らしの場の再生と革新-東日本大震災に鑑みて（第一次提言），2011. 9. 9.
- 3) 日本建築学会：建築の原点に立ち返る-暮らしの場の再生と革新-東日本大震災に鑑みて（第二次提言），2013. 5. 30.
- 4) 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，PP461-464，2013. 6.
- 5) 日本建築学会：建築物の減衰，日本建築学会，pp131-137，2000. 10. 1.