

建物の安全性即時診断システム

1ヶ所の地震計で地震後即時に建物の安全性を自動診断

森下真行・齊藤芳人・龍神弘明

地震に対する事業継続性においてはスピーディーな初動対応が非常に重要であり、建物管理者が専門家の判定を待たずに建物が継続して利用できるかの安全性を即時に把握したい、というニーズが高まりつつある。本稿での紹介システムはこのニーズに応える技術であり、地震発生直後、1ヶ所の地震計で計測された建物の揺れを自動的に解析・診断し、各階の安全性を評価した上で、建物所有者、管理者および使用者等に、診断結果とそれに基づく行動指針を、eメールで即時に自動発信するまでの一貫システムである。多拠点BCPとして運用することで、企業全体の事業継続性の向上に貢献できる技術である。

キーワード：建築、躯体、構造ヘルスマニタリング、BCP、初動支援

1. はじめに

平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震では、建物管理者が被災した建物が継続して利用できるかの安全性を即時に判断する手段がない、あるいは過去に経験したことのな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初動活動に支障が生じた例が確認されている。

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、現実には応急危険度判定を受けるまでに数日の期間を要するため、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^{2),3)}されており、多様なシステムが実用化され始めている。本稿で紹介するシステムは、1台の加速度センサから得られる情報を利用して建物の構造安全性診断を実現する、低コスト型の構造ヘルスマニタリングシステムである。

2. 開発システムの概要

開発システムは、1ヶ所の加速度センサとパソコンとから構成(図-1)されており、加速度センサによる観測データが一定値を超えることで、本システムが自動処理を開始する仕組みである。自動処理はパソコン制御で行われ、観測データの回収ならびに解析の自動実行、解析結果を利用した建物の構造安全性に関する診断結果のモニタ出力およびメール等を利用した情報発信までを一連の工程として自動実行される。本システムの特徴として、自動処理を担うパソコンを現地建物内に設置している点が挙げられる。通信環境の充実した昨今では、メンテナンス等を考慮し、データ保存やデータ処理等をクラウド側に配置したネットワーク型システムとしての構築が主流であると思われる。

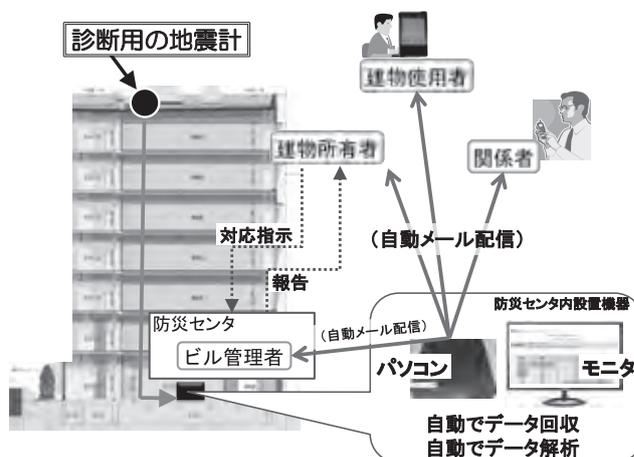


図-1 システム構成概念図

しかしながら、被災時の通信インフラの稼働停止や停電による電源喪失等の可能性を鑑みると、観測データの欠損に伴うシステムの停止あるいは遅延、メール等による診断結果の配信停止といった情報の可用性の観点で課題が残る。そこで、現地に無停電電源装置を配置し、被災時でも全システムが継続稼働すること、更に現地モニタにリアルタイムで診断結果を表示させるとともにプリンタへの自動出力機能を備えることで、この点を解決している。

3. 技術概要

開発システムでは、品川・三田の手法⁴⁾を拡張し、建物内1ヶ所の加速度記録から各階の絶対加速度応答および層間変形角を推定し、建物の構造等安全性評価指標として利用している。各階の応答を推定する際、建物の構造計算から求めた振動モデルを利用した手法が広く利用されている。しかしながら、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、振動モデルが存在しない中低層建物では都度振動モデルを構築する必要が生じる点が、システム普及の障害となっている。そこで本システムは、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、建物の振動モデルは利用しないことを前提とした。入力として必要な建物情報は、構造種別、階数ならびに各階高のみである。このように、入力情報を最小限とすることで汎用性を持たせた点も特徴である。以下に、最小限の建物情報と屋上階1ヶ所の加速度記録のみを基にした各階の応答推定手法の概要について述べる。

Step1 (固有振動数の推定)

屋上観測記録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、本手法では、屋上観測記録か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仮定する。

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。本手法では、振動モデルを利用しない方針であるため、各層の質量および剛性を別途設定する必要が生じる。各層の質量は、最下層を1とし、階数が1上がるごとに1%の比率で質量を低減させる、簡便な仮定とした。

各層の剛性は、地震層せん断力分布係数(以下、 A_i 分布と呼ぶ)を基に設定した初期値から最適な値を探索する方法を採用する。具体的には、先に設定し

た各層の質量を基に求めた A_i 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(最下層に対する相対比率で、各層の剛性を表現)を各層剛性の初期値とし、質量を固定、剛性を変動パラメータとした固有値解析の繰り返しにより最適解を求める。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が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。これにより最終的に評価関数(C)が最も小さくなる剛性分布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 : 固有値解析による 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 : 固有値解析による 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)

屋上階の1階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た上で、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。本稿では、全モードに対して鉄骨造の慣用値である2%を採用した。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について、下限振動数は後に示す積分処理を考慮して0.3 Hz、上限振動数は設定された多自由度の伝達関数の応答倍率において高振動数側での大きさが1となる振動数とした。

Step4 (1階入力波の推定)

屋上観測記録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、1階入力波を推定する。

Step5 (屋上観測記録のモード分解)

屋上観測記録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、屋上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)

屋上モード別波形と1階入力波との差分 (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1階入力波を各階ですべて足し合わせることで、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ことで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。

4. 推定精度の検証

(1) 検証建物および検証地震

検証対象とした建物は、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 (写真-1) であり、概ね整形な平面形状 (33.1m × 17.8m) をしている。竣工時 (2016年12月) より、屋上階を含めた全階で加速度センサによる地震観測 (図-2) を開始し、屋上設置の加速度センサが所定の揺れ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。

検証対象とした記録 (表-1) は、2015年5月25



写真-1 検証対象とした事務所ビル

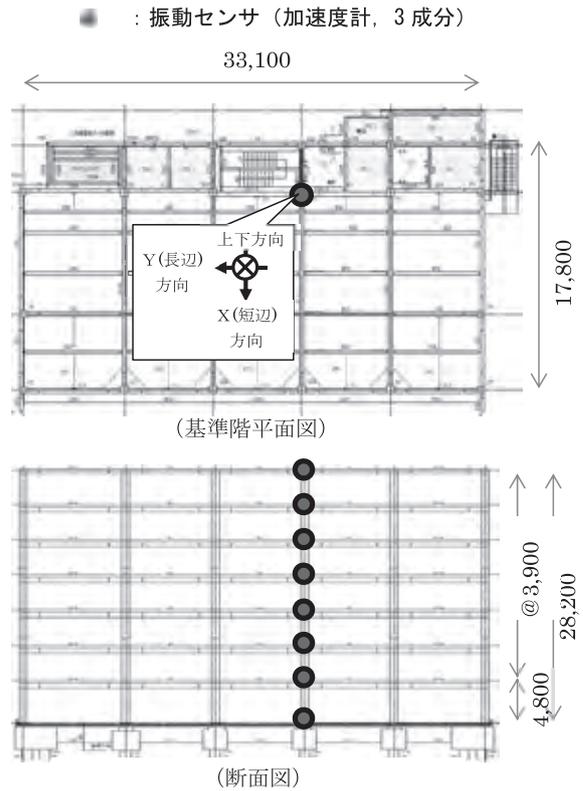


図-2 検証対象とした建物および地震観測の概要

表-1 検証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)
屋上階	78.2	84.6	62.2	92.9
1階	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

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。それぞれの地震では、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、当該建物1階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40 cm/s²程度、屋上階では60から90 cm/s²

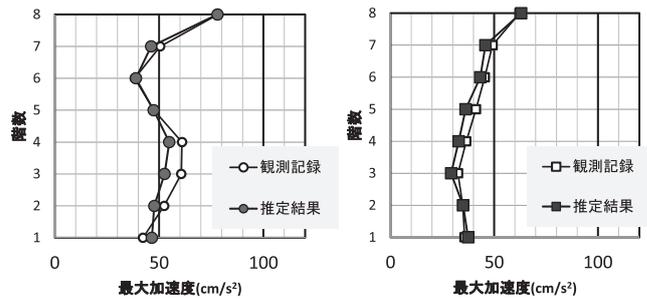
程度の最大加速度が記録されており、建物躯体は弾性挙動を示す範囲内であると推測される。本稿では、1階での最大加速度が大きくなるX（短辺）方向を検討対象として選定した。

(2) 検証結果

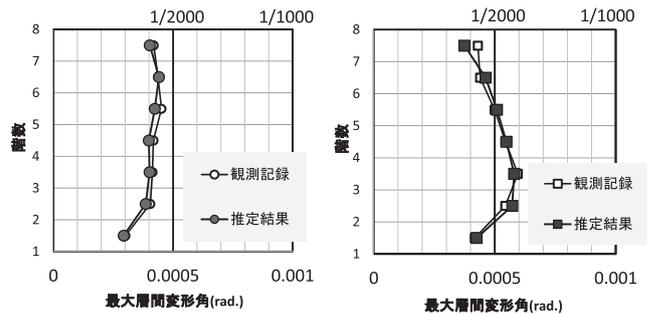
本手法および観測記録より求めた最大加速度（図—3）および最大層間変形角（図—4）の建物高さ方向での分布比較を行う。各最大値は、一部の層でやや小さな評価となるものの、地震によって異なる建物応答の特性の違いなど、本手法による推定結果は観測記録をよく表現できていると考えられる。最大加速度および最大層間変形角の観測記録に対する誤差率（図—5）比較を行う。観測記録に対する誤差率について、最大加速度は両地震とも13%以内に収まっており、概ね良い対応を示すことが確認できた。最大層間変形角の比較では、地震No.1は誤差率6%以内に収まっているが、地震No.2では最大14%の誤差を含み、両地震で誤差率に差の生じる結果となった。ただし、地震No.2で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し、地震直後の応急的な構造安全性診断技術としては十分実用的な精度を有すると考えられる。

最後に、分析過程で推定された建物の振動モード形状の妥当性について考察する。地震No.1に対して本手法（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比較（図—6）する。

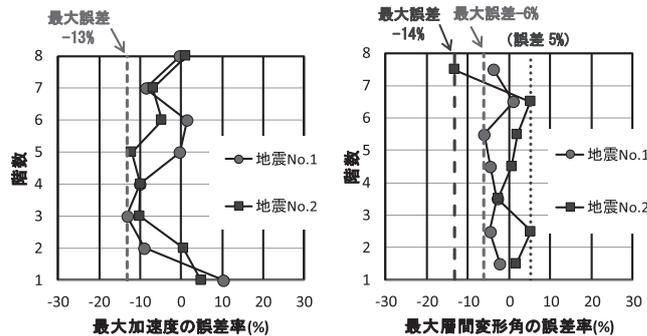
本手法により推定された1次の振動モード形状は、起振試験ならびに常時微動による形状と概ね対応した結果が得られている。2次モードに関して、本手法による振動モード形状はモードの腹近傍（4階付近）で他の手法によるものと比較してやや小さめに推定されているものの、全体的な傾向はよく捉えられている。3次モードに関しては、3手法間で若干のバラツキが認められるが、全体的な傾向は概ね捉えられている。起振試験ならびに常時微動より求めた振動モード形状は微小振幅時の結果であり、これらより振幅の大きな地震記録を用いて推定された振動モード形状と完全に対応するものではない。しかしながら、3手法ともに概ね同様の傾向を示すなど全体的な特性は捉えられており、また低次モードほど精度よく推定されている可能性が高いと考えられる。なお、本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



図—3 最大加速度の建物の高さ方向分布

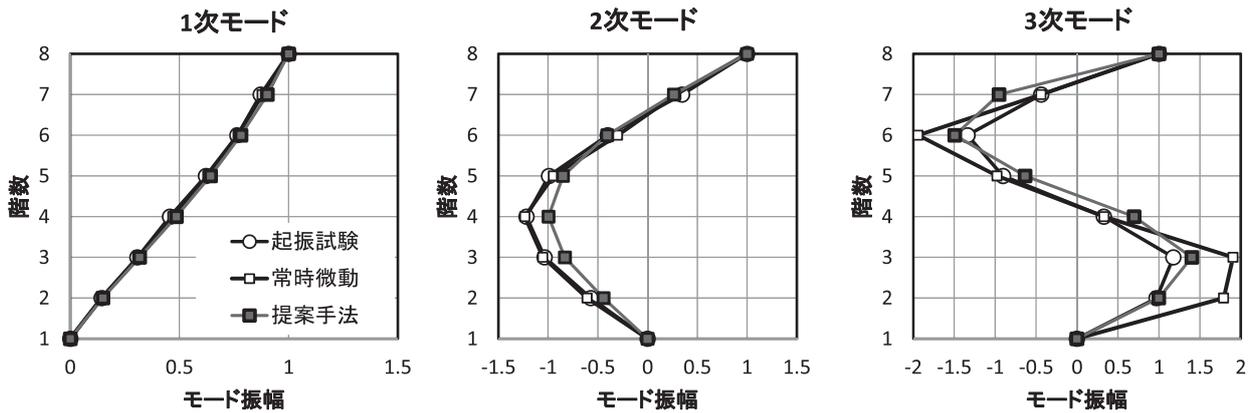


図—4 最大層間変形角の建物の高さ方向分布



図—5 最大応答推定値の誤差分布

ね同様の結果が得られていることを確認している。最大加速度の分布において、地震No.2の結果は直線的な分布性状であるのに対し、地震No.1の結果はS字カーブに近い分布性状を示す。地震No.1は直下型に分類される地震であり、高次のモードに対応した地震動成分が減衰しきれず建物へ入力され、その結果比較的高次モードまで励起される。S字カーブ形状は3次モードに対応する形状であることから、本建物の場合、3次モードまでは考慮する必要があると判断できる。最大層間変形角が最大加速度に比べ観測記録と比較的良好な対応を示す点については、建物の変形は低次モードが支配的であること、および振動モード形状は低次モードほど精度良く推定されている可能性が高いこと、などがその要因であると考えられる。



図一六 本手法により推定された振動モード形状 (地震 No.1)

以上より、本手法による推定結果は、入力 of 最大加速度で 40 cm/s^2 程度、最大層間変形角で $1/2,000 \text{ rad}$ 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構造安全性診断技術としては十分実用的な精度を有すると考えられる。なお本稿では、実際の地震時の揺れを用いた検証結果のみを示した。シミュレーション結果との比較検証も実施^{6), 7)}しているが、誌面の都合上省略した。また、地震センサ設置階は全振動モードが観測される屋上階が理想的ではあるが、現実には屋上階への設置が困難な場合も想定される。その場合、推定精度は低下するが屋上階以外の階での観測にも適用可能⁸⁾な手法である。

5. おわりに

本稿では、地震直後の建物の安全性を、1台の加速度センサ情報のみを利用して建物の構造安全性診断を実現するシステムについて、その概要および鉄骨造事務所ビルにおける実地震に対する観測記録と推定結果の比較による妥当性検証について紹介した。本システムは、迅速な初動活動への着手支援や二次災害防止など企業の事業継続に大いに役立つと考えられる。



《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年12月
- 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年9月9日
- 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年5月30日
- 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年6月
- 5) 日本建築学会：建築物の減衰, 日本建築学会, pp131-137, 2000年10月1日
- 6) 森下真行, 龍神弘明, 齊藤芳人：建物の安全性即時診断システムの開発, 前田建設工業技術研究所報, VOL56, 2015年
- 7) 森下真行, 齊藤芳人, 龍神弘明, 三田彰：建物の構造安全性即時診断システムの開発 その1 診断手法の提案と妥当性確認, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp983-984, 2015年9月
- 8) 森下真行, 齊藤芳人, 龍神弘明：建物の構造安全性即時診断システムの開発 その2 診断手法の改善と観測階の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp943-944, 2016年8月

【筆者紹介】



森下 真行 (もりした ただゆき)
前田建設工業(株)
技術研究所
室長



齊藤 芳人 (さいとう よしひと)
前田建設工業(株)
技術研究所
副所長



龍神 弘明 (りゅうじん ひろあき)
前田建設工業(株)
技術研究所
主管研究員