

## 2種の3次スプライン補間を用いた建物応答推定手法

小松原 知将 馮 徳民  
中川 太郎

### 概 要

近年、地震の直後に建物が安全か否かを判断する構造ヘルスマニタリングシステムの運用が広がりを見せている。構造ヘルスマニタリングシステムでは、建物を長期にモニタリングするために加速度計を建物に取り付けることが一般的だが、規模の大きい建物ではモニタリングに多くの加速度計が必要となり、導入が難しい場合がある。また多くのケースでは、建物情報から建物全体の応答を推定している。筆者らは既往の手法を改良し、加速度計の設置位置の高さと少数の加速度記録のみから2種類の3次スプライン補間を用いて建物の応答を推定する手法を提案する。

検討では、10層、20層の解析モデルを作成しパラメータスタディを行い、2種の3次スプライン補間を足し合わせる割合を決定した。その後、決定した割合を用いてS造18層縮小試験体の振動台実験の結果に本手法を適用し、高い精度で推定できることを確認した。

### Building response estimation method using two types of cubic spline interpolation

#### Abstract

In recent years, structural health monitoring systems, which estimate the damage of buildings immediately after an earthquake, have been widely adopted in practice. In structural health monitoring systems, many accelerometers are usually required for monitoring. Building information is also used to obtain the response of the building. The authors improved the existing method using combinations of two types of cubic spline to estimate the building response. In the method, only the height of the accelerometer installation positions and limited acceleration records are required.

In the study, we performed a parametric study to determine the best combination ratio of the two cubic splines using 10-story and 20-story building models. Then, we applied this best combination ratio to estimate the response result of the shaking table experiment of an 18-story scaled-down steel structure and confirmed that the response can be estimated well by this method.

キーワード:	構造ヘルスマニタリング 応答推定、3次スプライン補間
--------	-------------------------------

## §1. はじめに

近年、構造ヘルスマonitoringシステムの運用が広がりを見せている。2013年に施行された「東京都帰宅困難者対策条例」や2018年6月公表の国土交通省「防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン」では、大地震後に建物に留まることが可能か否かを数時間以内に判断することが求められ、構造ヘルスマonitoringシステムの需要は益々高まっている。

構造ヘルスマonitoringシステムを建物に導入する際、建物を長期にモニタリングするために加速度計を配置する必要があるが、様々な要因から建物全体に配置することが難しいケースが存在する。そのため、建物情報と少ない加速度計の記録から建物全体の応答を推定する研究が多く行われている。

応答を推定する手法として、3次スプライン補間を用いて加速度計を設置していない階の応答を補間する手法が存在する。既往の研究では、2種類の3次スプライン補間を柱脚固定度という割合で足し合わせる手法<sup>2)</sup>が存在するが、柱脚固定度が0~1の範囲に収まらず使用できない場合が存在するほか、3次スプラインに使用する加速度計に加えて、柱脚固定度の計算用に加速度計を1つ多く配置する必要がある。

本報では、建物の高さ情報と4点の加速度記録のみを用いて2種の3次スプライン補間を行い、パラメータスタディから決定した割合で足し合わせることで、加速度計を設置していない階の応答を推定する方法を報告する。パラメータスタディは解析モデルを作成して行い、2つのスプライン補間を足し合わせる割合を決定する。その割合を用いて、E-Defense<sup>4)</sup>で行われた振動台実験の記録の推定を行い、推定精度の検証を行う。

## §2. 応答推定手法

本報で用いる応答推定アルゴリズムでは、20階建て以下の建物を対象に、建物の4点で観測された加速度記録と建物の高さ情報を用いて3次スプライン補間を行い、観測点以外の階の加速度時刻歴を推定する。相対変位、層間変位は推定により得られた加速度を2回積分して得られるものを推定値とする。建物に設置する4つの観測点は図1のように、建物の1FLとRFL、そして建物を高さ方向に均等に3分割する階に2か所設置する。3次スプライン補間の境界条件は、端部である1FLとRFLで一次導関数が0になる条件(以下固定条件)と1FLとRFLにおける三次導関数が隣接点と同じとなるknot-a-not条件(以下ピン条件)の2種類設定し、固定条件とピン条件で算出した2種類の3次スプライン補間

の結果を図2に示すように、任意の割合で配分することで推定を行う。本手法において必要な情報は、限られた階の加速度時刻歴と、建物の高さ、階高のみであり、必要な情報が少ない点の特徴である。本手法はLimongelli(2003)<sup>1)</sup>、小寺他<sup>2)</sup>の手法を参考に構築したものであり、観測点が4点で良い点や割合をパラメータとしている点で異なる。

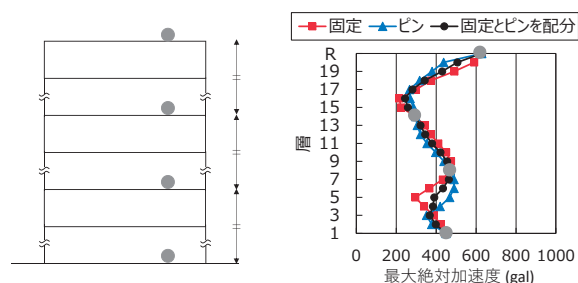


図1 観測点概念図

図2 スプライン補間の配分

## §3. パラメータスタディによる配分率の決定

### 3.1 決定方法

2種の3次スプライン補間を足し合わせる割合の決定は以下の手順で行う。解析モデルを作成し、時刻歴応答解析を行い、全階の絶対加速度時刻歴を得る。前述方針に従い観測点を設置し、その点の絶対加速度を仮定の観測値として、観測点以外の階の絶対加速度をピン条件と固定条件の配分を変化させながら推定を行う。仮定の観測点の絶対加速度と推定で得られた絶対加速度に0.05~0.10Hzのハイパスフィルタをかけて積分を行い、層間変形角を算出する。最大絶対加速度、最大層間変形角について、後述する式により推定誤差を算出する。この操作を複数の入力地震動に対して行い、配分率毎に推定誤差の平均値と標準偏差を算出する。そして、平均値+標準偏差の値が最も小さくなる配分率を最良配分率として決定し、その配分率における推定精度を確認する。

### 3.2 解析概要

建物の解析・推定に使用したモデルは、「日本免震構造協会：パッシブ制振構造設計・施工マニュアル<sup>3)</sup>」に記載された10層、20層のテーマストラクチャーモデルの在来モデルのせん断モデル、曲げせん断モデルの両モデルを用いた。なお、本報では紙面の都合上20層モデルについてのみ報告する。入力地震動は著名波1940エルセントロNS、1968八戸NS、1995 JMA 神戸NSを、L1 (25kine)、L2 (50kine)に最大速度を基準化して用いた。観測点の設定は20層モデルでは建物を均等に分割するように設定することができないため、均等に近い配置を3パターン設定した。また、本解析における最大入力加速度は510gal(エルセントロ

NS L2)、最大層間変形角は1/80(八戸NS L2)となった。

### 3.3 推定誤差の評価

推定値と解析値の誤差の評価は提案した式(1)により推定誤差sを算出し評価する。式(1)のiは階、EとCはそれぞれ最大絶対加速度または最大層間変形角の推定値と解析値を表している。

$$s = \frac{\sum |E_i - C_i|}{\sum C_i} \quad (式1)$$

解析値と推定値の差が同じである場合、比率で評価すると解析値の小さい階での推定誤差を大きく評価してしまうため、差を評価する式を提案した。

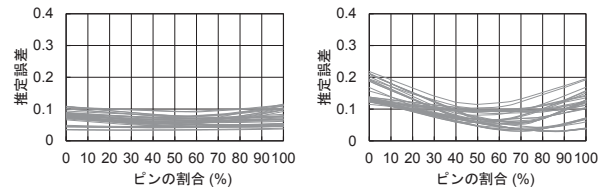
図3は、最大絶対加速度、最大層間変形角について、横軸にピンの割合を、縦軸に推定誤差を示したグラフである。図3にはせん断、曲げせん断モデルの2ケース、観測点設定階で3ケース、入力地震動で6ケースの、計36ケースの結果を示している。最大絶対加速度はケースごとのばらつきが小さく、ピンの割合が50%~60%で配分するのが良いと考えられるが、最大層間変形角は50%以上でばらつきが大きい結果となった。

### 3.4 推定誤差の評価と配分率

ケースごとのばらつきを考慮するため、平均値+標準偏差を用いる。ピンの割合ごとに推定誤差の平均値と平均値+標準偏差を図4に示す。推定誤差の平均値を実線で、平均値+標準偏差を点線で示し、点線まで塗りつぶした範囲には図3で示したケースの約86%が含まれている。本報では、このばらつきを考慮した平均値+標準偏差が最小となる点をアルゴリズムで用いる最良配分率とする。図4に推定誤差の平均値+標準偏差の値が最小となる点を丸で示す。推定誤差の平均値+標準偏差の値が最小をとるピンの配分率は、最大絶対加速度については55%、最大層間変形角については57%となった(以降、この配分率を20層配分と呼ぶ)。最大層間変形角の推定誤差は平均値で見ると60%~70%の間で最小をとるが、標準偏差を考慮したことにより最大絶対加速度と近い配分率で最小をとる結果となった。また、20層配分における推定誤差は最大絶対加速度、最大層間変形角ともに0.1以下となった。

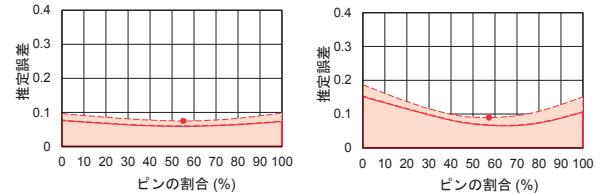
### 3.5 推定誤差の評価

図5に、20層配分を用いて解析を行った結果の一例としてJMA神戸NSのL1とL2を入力した3ケースを示す。図中の矢印は推定時に観測点として設定した点を示している。いずれのケースも精度よく推定できており、提案式(1)による推定誤差は0.1以下であれば精度よく推定できると考えられ



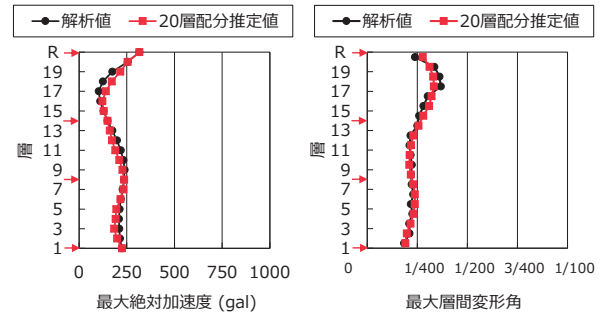
(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

図3 推定誤差



(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

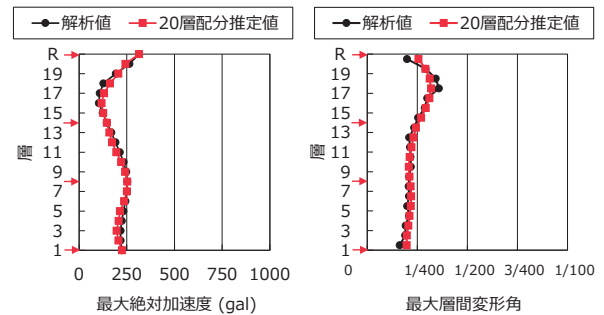
図4 推定誤差の平均値と平均値+標準偏差



(a) せん断モデル (b) せん断モデル

神戸L1 最大絶対加速度

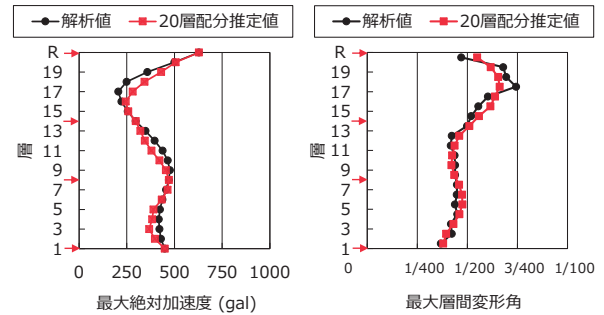
神戸L1 最大層間変形角



(c) 曲げせん断モデル (d) 曲げせん断モデル

神戸L1 最大絶対加速度

神戸L1 最大層間変形角



(e) せん断モデル (f) せん断モデル

神戸L2 最大絶対加速度

神戸L2 最大層間変形角

図5 20層モデル解析値 推定値

る。L1入力時の結果である(a)～(d)は、せん断モデル、曲げせん断モデルで結果の差はほとんどない。L2入力時の(e)、(f)はL1入力時に比べ、応答の大きい階で推定値と解析値に多少の差が生じた。また、本報では示していないが、L2入力時は曲げせん断モデルのほうが若干推定値と解析値の差は大きくなった。10層モデルはせん断と曲げせん断モデルで結果の差は小さく、20層モデルよりも精度よく推定することができた。これは、10層モデルは20層モデルよりも相対的に加速度計の密度が高いためだと考えられる。

## §4. 配分率の振動台実験への適用

### 4.1 振動台実験の概要

検証にはE-Defenseにて行われた「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」の実験結果を用いた。実験の試験体は実大18層建物の1/3スケールで、高さが25.34m、平面寸法が6m×5m、建物重量が420tである。加速度センサは、各層1台が基本の計25台が設置されている。変位計は、1～3Fに層間変位を直接測定したレーザー型変位計、2～9Fの東と西それぞれにワイヤ型変位計などが設置されているが、本報で変位の値は加速度を積分したものをを用いている。加振方向は長手方向の一方加振で、入力地震動は南海トラフ三連動地震を想定して作成された長周期地震動である。

### 4.2 検証ケース

実験では、入力地震動の倍率を徐々に大きくして加振し、最終的に試験体を崩壊させている。本報は、そのうちの5ケースについて検証を行う。表1はその5ケースについて、地震動倍率、加振レベル、最大層間変形角をまとめたものである。各ケースにおける加振波の大きさと試験時の試験体に関しては、ケース40は告示極稀地震動の1/2レベルで試験体は弾性範囲内、ケース81は告示極稀地震動の等倍レベルで部材が一部塑性化、ケース180-1は三連動地震の想定最大級レベルで部材劣化進展、ケース220、300は想定最大級超えレベルで試験体に変形が起ったと報告されている。

表1 振動台実験検証ケース

ケース名	地震動倍率(倍)	加振レベル(gal)	最大層間変形角
40	0.37	40	1/175
81	0.74	81	1/104
180-1	1.64	180	1/62
220	2.00	220	1/52
300	2.73	300	1/32

### 4.3 検証手順

推定に使用する観測点は4点を均等に配置し、1、7、13、RFとした。4点の加速度を用いて3.4節で決定した20層配分を用いて推定を行う。加えて、ケース毎に3章に示した手法で最良配分率(以降ケース毎最良配分と呼ぶ)を算出し推定を行い、観測値、20層配分を用いた推定値、ケース毎最良配分を用いた推定値の3つを用いて検証を行う。

検証で用いる加速度時刻歴は観測値の加速度時刻歴に20～25Hzのローパスフィルタをかけて使用した。変位を算出する際の周波数積分では、0.1～0.2Hzのハイパスフィルタをかけて積分を行った。これらのフィルタは、最大絶対加速度と最大層間変形角が実験報告書<sup>2)</sup>に記載された観測値と概ね同じ値をとるよう設定した。

推定値の精度検証は、3.3節と同様最大絶対加速度と最大層間変形角を用いて検証を行う。

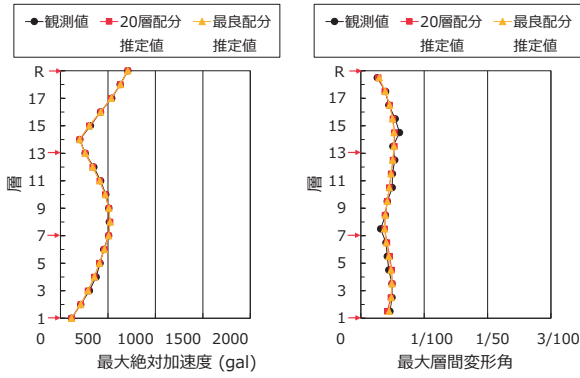
### 4.4 検証結果

表2に、各ケース、20層配分の推定誤差と、ケース毎最良配分の推定誤差をまとめたものを示す。全体的な傾向として、20層配分とケース毎最良配分ともに、ケースが進み加振レベルが大きくなるほどに推定誤差が大きくなる傾向があり、最大絶対加速度ではケース40とケース81の間で推定誤差が大きく増加し、最大層間変形角はケース220とケース300の間で推定誤差が大きく増加した。また、最大絶対加速度は、ケースによっては配分率に差があるものの、20層配分とケース毎最良配分で推定誤差は概ね同じであった。最大層間変形角は、ケース300において、20層配分とケース毎最良配分とで配分率、推定誤差が共に大きく異なる結果となった。また、表2において3章と同様に推定誤差が0.1未満となるのはケース180-1までとなった。

表2 ピンの配分率と推定誤差

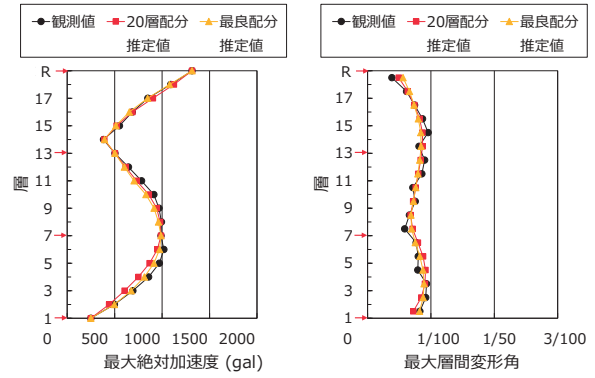
ケース名	最大絶対加速度			最大層間変形角		
	ピンの配分率(%)	推定誤差s		ピンの配分率(%)	推定誤差s	
40	20層配分	55	0.014	20層配分	57	0.063
	ケース毎最良配分	56	0.014	ケース毎最良配分	66	0.057
81	20層配分	55	0.049	20層配分	57	0.079
	ケース毎最良配分	76	0.037	ケース毎最良配分	70	0.072
180-1	20層配分	55	0.032	20層配分	57	0.093
	ケース毎最良配分	65	0.032	ケース毎最良配分	68	0.089
220	20層配分	55	0.047	20層配分	57	0.104
	ケース毎最良配分	68	0.046	ケース毎最良配分	67	0.099
300	20層配分	55	0.055	20層配分	57	0.186
	ケース毎最良配分	93	0.048	ケース毎最良配分	82	0.156

図6～10に、各ケースの最大絶対加速度、最大層間変形角について、観測値と、20層配分の推定値、ケース毎最良配分の推定値をそれぞれ示す。また、図中の矢印は図5と同様に推定時に観測点として設定した点を示している。



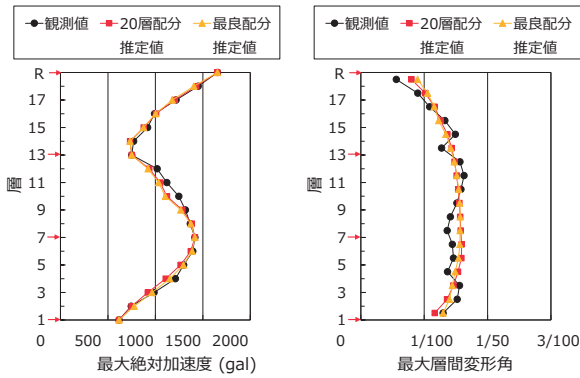
(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

図6 ケース40 検証結果



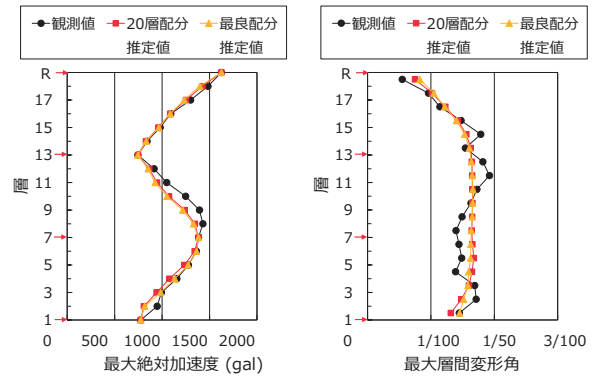
(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

図7 ケース81 検証結果



(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

図8 ケース180-1 検証結果



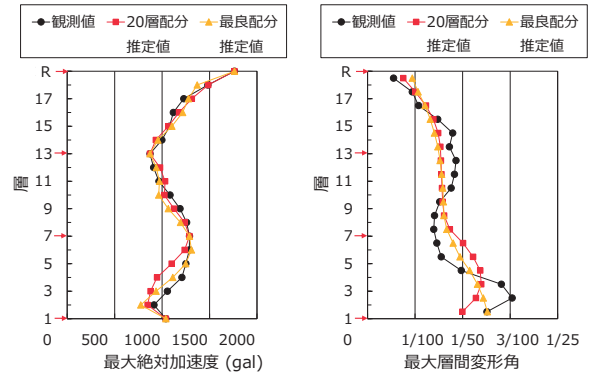
(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

図9 ケース220 検証結果

最も加振レベルが小さく、弾性範囲内であった図6に示すケース40は、最大絶対加速度、最大層間変形角ともに、20層配分とケース毎最良配分の差は小さく、観測値とよく一致している。

部材が一部塑性化した図7に示すケース81はケース40と同様に20層配分とケース毎最良配分の差は小さく、観測値とよく一致していることが確認できたが、最大層間変形角の大きい3F～6Fで最大絶対加速度の推定値と観測値に差が生じている。表2において、ケース40とケース81の間で最大絶対加速度の推定誤差が大きく増加したのは、このためと考えられ、本推定手法では部材の塑性化が始まると最大絶対加速度の推定精度が低下すると考えられる。

部材の劣化が進展した図8に示すケース180-1は、20層配分とケース毎最良配分の差は小さく、観測値とよく一致していることが確認できたが、最大絶対加速度の推定精度はケース81とほとんど変わらないものの、最大層間変形角はケース81に比べて推定精度が低下する結果となった。観測値では14Fや2F、3Fで最大層間変形角の大きくなる階がある一方で、推定値では大きくなりず、滑らかな曲線となることが確認できた。この結果から、本推定手法では塑性化が進み、特定階の応答が大きくなる場合にはその階の推定精度が低くなると考えられる。このような結果になった要因は、



(a) 最大絶対加速度 (b) 最大層間変形角

図10 ケース300 検証結果

スプライン補間が点と点を滑らかに補間する性質があるためと考えられる。また、本ケースまでが最大層間変形角の推定誤差が0.1以下となるケースであり、3章と同様に推定誤差は0.1以下であれば精度よく推定できることが確認できた。

最大層間変形角が1/50付近になる大変形が起こった図9に示すケース220は、20層配分とケース毎最良配分の差は小さいものの、最大層間変形角は観測値と差が生じる結果となった。最大絶対加速度の推定精度はケース180-1から多少低下した程度で推定できているといえるが、最大層間変形角はケース180-1で考察した通り、最大層間変形角が

大きくなる階の推定精度は低下した。

最大層間変形角が1/30付近になる大変形が起こった図10に示すケース300は、最大絶対加速度は概ね推定できているが、最大層間変形角は20層配分、ケース毎最良配分、観測値がそれぞれ大きく異なる結果となった。

## §5. まとめ

本報告では2種類の3次スプライン補間を用いて加速度計の設置していない階の応答を推定する手法を提案した。

提案手法について以下にまとめる。

- (1) 2種類の3次スプライン補間を組み合わせることで、加速度計の設置されていない階の応答を推定する手法を提案した。
- (2) 解析モデルを作成し、パラメータスタディの結果を提案した推定誤差の式で評価することで、2種類の3次スプライン補間を足し合わせる配分を決定した。また、評価の際にはばらつきを考慮するために推定誤差の平均値+標準偏差で評価した。
- (3) 決定した配分において、最大絶対加速度、最大層間変形角ともに推定誤差は0.1以下であった。

パラメータスタディより決定した配分を用いて、提案手法を振動台実験結果に適用し、精度の検証を行った。以下に検証によって得られた知見をまとめる。

- (1) 最大絶対加速度、最大層間変形角ともに弾性範囲内において高い推定精度を示した。
- (2) 部材の塑性化が始まると最大絶対加速度の推定精度は低下するが、最大絶対加速度は地震波のレベルによらず高い推定精度を示した。
- (3) 部材の塑性化が進むにつれ、最大層間変形角の推定精度は低下し、推定精度が十分といえるのはケース180-1、最大層間変形角1/64までであった。
- (4) パラメータスタディと同様、最大絶対加速度、最大層間変形角ともに精度よく推定できる時の推定誤差は0.1以下であった。
- (5) パラメータスタディ結果から得られた配分率を用いた推定結果は、加振ケース毎に求めた最良の配分率と概ね同等の推定精度を示し、本報で決定した配分の有用性が確認できた。

本報において、高い精度で推定が行えたのは、20層モデルのパラメータスタディ結果を規模の近い18層の振動台実験結果に適用したためと考えられる。今後は、規模や架構形式の異なる様々な建物の観測記録を用いて、本応答推定手法を多くの建物に適用できるよう検証を進めたいと

考えている。

## 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より「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」のデータを使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

本研究の遂行にあたり、東京理科大学理工学部建築学科の村松杏理氏には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) Limongelli, M. P. :, Optimal location of sensors for reconstruction of seismic responses through spline function interpolation、EESD、Vol32、No.7:1055-1074、2003
- 2) 小寺健三、西谷章、沖原有里奈: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、2018
- 3) 日本免震構造協会:バッシブ制振構造設計・施工マニュアル、2013
- 4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所「E-Defense 実験データアーカイブ(ASEBI)」<https://doi.org/10.17598/nied.0020> より課題名「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」
- 5) 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
- 6) 森井雄史ほか: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、日本建築学会構造系論文集、第81巻、第730号、pp2045-2055、2016.12
- 7) 小松原知将、村松杏理、馮徳民:2種の3次スプライン補間の組合せを用いた建物応答推定手法 その1:応答アルゴリズムと配分率の決定、2022
- 8) 村松杏理、小松原知将、馮徳民:2種の3次スプライン補間の組合せを用いた建物応答推定手法 その2:18層S造振動台実験結果を用いた検証、2022

## ひとこと

本手法は実験結果に対し、非常に高い推定精度を示しました。今後は実建物に適用可能か検証を行いたいと考えています



小松原 知将