

論文 高層 RC 造建物における少数加速度センサによる非観測層の応答推定手法に関する検討

菊池 友介*1・梨本 優也*1・鈴木 裕介*2・前田 匡樹*3

要旨： 縮小 20 層 RC 造架構試験体の振動台実験の結果から、高層 RC 造建物における非観測層の応答推定手法について比較・検討を行い手法の精度，妥当性を検証した。また，最適モード境界によるフィルタリングの方法を提案し，観測点数が少ない場合には線形補間などの推定方法に比べ，非観測層の応答をモード形によって推定する手法が有用であることを示した。

キーワード： 非観測層，応答推定，フィルタリング，モード形

1. はじめに

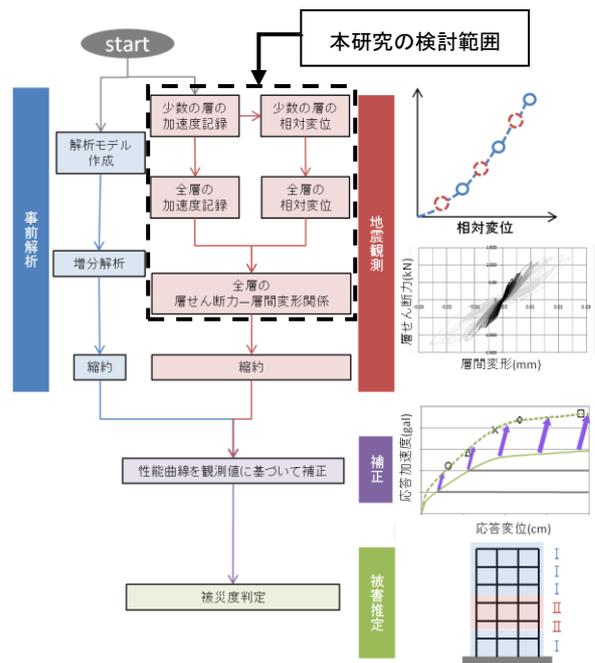
現在，老朽化した建物の増加や新築需要の低下などの背景から，建物の耐用年数の長期化が求められている。この対策として，維持管理・改修を行う方法が考えられ，被災した際に改修を適切に，かつ迅速に行うことで建物の長寿命化，二次災害の低減，早期の復旧を図ることができると考えられる。

建物の改修を合理的に実施するには，被災した建物の損傷状態・残存耐震性能の適切な評価が不可欠であるが，中大規模の建物であっても，技術者による目視点検での調査を基とした健全性評価がなされているのが一般的であり，これには多大な労力と時間を要する。

以上に対して，近年では建物にセンサ（主に，加速度計）を設置することで損傷状態を検知する構造ヘルスマonitoringが注目されている。センサが設置された建物件数も増えてきており，センサにより観測された応答から建物の残存耐震性能を高精度に評価できれば，大幅な省力化を期待することができる。

既報，文献 1)，2) においては設計慣行に基づいて作成された解析モデルを用いた縮小 20 層 RC 造建物の即時損傷推定と耐震性能評価手法の検討がなされた。結果として，小変形領域における観測記録のみを用いて，解析モデルの性能曲線を修正することで，大変形時に至るまでの性能曲線の推定が可能となり，被災建物の残存耐震性能及び被災度を概ね評価できることを示し，かつ，今後起こり得る地震に対する応答予測ができる可能性を示唆した。しかしこれは，各層すべてにセンサが設置され，全層の応答加速度記録が得られる場合にのみ適用される。

実際の建築物においては，設置の手間やコストの問題から全層に加速度センサが設置される例はほとんどない。よって，被災建物の残存耐震性能を評価する際，



図ー1 少数加速度センサによる被災度判定の概略と本検討の位置付け

既報 2) に対し精度を損なわずに実施するためには加速度センサ非設置層の応答を精度良く推定することが重要であると考えられる。そこで本研究では，観測層の加速度データを用い，非観測層の応答推定手法について検討することを目的とする。既往の研究，文献 3)，4) においても少数の加速度センサの応答加速度記録による非設置階の応答推定手法の検討がなされている。しかし，これらは設計解析モデルの地震応答解析結果との比較により考察しており，実際の建物の挙動を正確に捉えられていない可能性が考えられる。また，既往の研究 3),4) では観測点数を仮定し検討を行っているが，観測点数が変動する場合の精度については考慮さ

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)
 *2 東北大学 災害科学国際研究所 助教 博士 (工学) (正会員)
 *3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

れていない。そこで、本推定手法を E-defense で実施された縮小 20 層 RC 造試験体の振動台実験結果に適用し、その妥当性について検討することでより実現象に近い推定結果の検証が行うことができ、また、いくつかの推定手法を各観測点数について検討することで、設置加速度計数に応じたより最適な応答推定手法を検討できると考えられる。図-1 には既報²⁾に基づいた少数の加速度センサの観測データを用いた被災度判定までの概略と本検討の位置付けを示す。

2. 非観測層応答推定手法の概略と手法の説明

2.1 非観測層応答推定手法の概要

観測層の加速度データを用いてセンサ非設置層の応答を推定するにあたり、最も端的な手法としては、センサ設置層の応答値をそのまま使用して線形（または 2 次曲線など非線形）補間し、非観測層の応答を抽出するなどが挙げられる。しかし、高層建物の応答変形には高次の振動モードが大きく影響するため、簡略的な補間による非観測層の応答推定では精度および汎用性が乏しくなると考えられる。そこで、フーリエ変換（FFT）により観測層の加速度データをフーリエスペクトルに変換しフィルタリングを行い、モード（本検討では 3 次モードまでを対象とする）それぞれの応答に分解することによりモードごとに対して非観測層の応答推定を行う。なお、フーリエスペクトルを各モードに分解する際、各モード間の周波数境界を設定する必要があるが、この設定の方法については 2.2 節で詳しく述べる。

1 次、2 次、3 次モードそれぞれにおいて算出した観測層での時刻歴加速度波形を、時間領域における累積台形数値積分により二階積分し絶対変位を求め、時刻歴相対変位波形を算出した。本検討ではこれらを時刻歴中の各ステップにおいて線形補間推定、スプライン補間推定、モード形推定といった三種類の推定手法を用い、各モードの応答を推定し、モードごとの応答を足し合わせることで全層の相対変位を算出する。それぞれの推定方法については 2.3 節で詳しく述べる。また、絶対加速度は相対変位に比べ応答のばらつきが大きいことから、推定により算出された絶対変位を二階微分することにより絶対加速度を算出している。

2.2 フィルタリング時における最適モード境界周波数の設定

2.1 節で述べたように応答を各モードに分割する際には、図-2 に示すようにモードごとに境界を設定しフィルタリングを行う必要がある。一般的にはフーリエスペクトルにおける各モードの谷のところに境界位置を設定しフィルタリングを行うが、各モードの谷の部分には両側のモード成分が混在しており、境界位置

の設定の仕方によりフーリエ逆変換をした際の応答が異なる。

そこで、本手法では観測値から平均的な相対変位分布を抽出し、フィルタリングを行った後の相対変位の形状が最も近づくような周波数境界位置（以下、最適モード境界周波数）を検出した。ここで、観測値から抽出した相対変位分布とは、建物頂部の時刻歴中における小変形時のステップを取り除いた相対変位分布の平均とした。

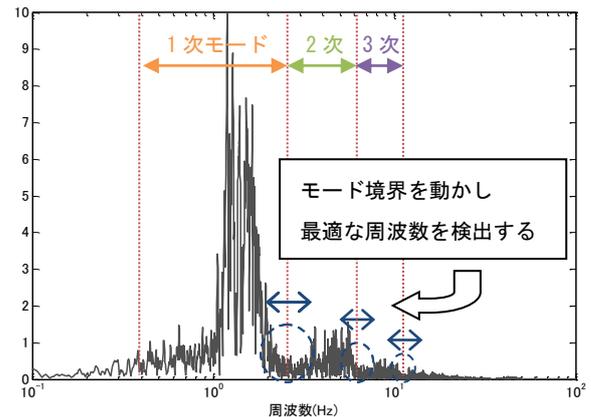


図-2 フーリエスペクトルのモード境界設定

2.3 各推定手法の説明

本節では、前述した線形補間・スプライン補間・モード形推定の推定方法を説明する。

(1) 線形補間推定

観測層間の相対変位を線形で補間することにより非観測層の応答推定を行っている。

(2) スプライン補間推定

スプライン補間⁵⁾は補間する領域をデータ間隔に区切り、その近傍の値を使い低次の多項式で近似することを考え区分的に近似関数を用い、導関数が連続になるように近似している。本検討では 3 次のスプライン補間を使用し推定を行っている。

(3) モード形推定

モード形推定では任意のステップにおける層ごとの相対変位分布が各モード形状と同様であると仮定し、解析モデルにおいて弾性を仮定した固有値解析から算出した刺激関数を推定用のモード形として用いている。図-3 に示すように、刺激関数を比例倍し、最小二乗法により観測層における誤差が最も小さくなるように推定を行った。ここで、モード形推定においては各ステップで最小二乗法を適用していることで、相対変位の波形が時刻歴で不連続となり相対変位が急激に変化してしまう点が存在する。そのため、絶対加速度が実際よりも過大に評価されてしまう場合がある。そこで、

モード形における絶対加速度の算出には絶対加速度の特異値を除去した波形（モード形推定加速度 a）と応答加速度分布も各モードに分解すると概ねモード形状の応答を示すと考え、応答加速度においても相対変位と同様の手法を用いてモード形推定を行い、推定加速度（モード形推定加速度 b）を算出し検討した。

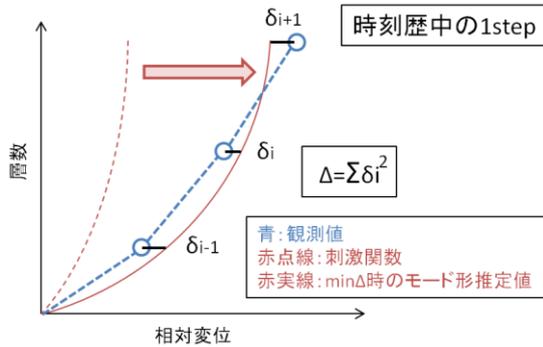


図-3 最小二乗法によるモード推定概念図

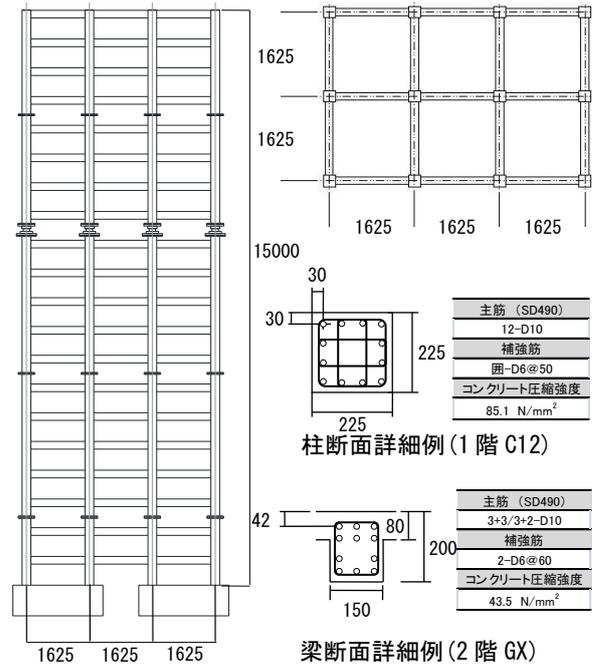


図-4 試験体図、柱・梁断面図（単位：mm）¹⁾

3. 検討に用いる実験の概要

本研究において解析対象とする実験は、建築基準整備促進事業（委員長：塩原等東京大学教授）⁹⁾において2012年にE-defenseで実施された、縮小20層RC造試験体の振動台実験である。以下、対象実験の概要を説明するが、詳細については文献6)を参照されたい。

3.1 試験体

図-4に試験体図と柱・梁断面の例、使用材料諸元を示す。試験体は高さ60m、20層RC造ラーメン架構の高層建物を想定し、実在する高層集合住宅の断面・配筋を参考に、1/4に縮小したもの（高さ15m）としている。各階の階高は750mm、柱断面は225mm×225mm、梁断面は150mm×200mmである。

3.2 入力地震波

表-1に主な加振ケースを示す。Run.1, 2, 3は東北地方太平洋沖地震による東京都での観測波（以下、東京観測波）をそれぞれ100%, 200%, 300%に増幅したものである。Run.4, 5は南海トラフ地震を想定した愛知県での模擬地震波（以下、津島波）をそれぞれ150%, 200%に増幅したものである。

3.3 実験結果

Run.1, Run.2ではひび割れは発生したが降伏箇所は確認されず、Run.3で梁が降伏し始めRun.4, 5では柱も降伏した。Run.5では層間変形角1/35という大変形であったが倒壊には至らなかった。主に梁部材に降伏ヒンジが形成されているため、建物の崩壊形式は梁降伏先行の全体崩壊型であると考えられる。

表-1 加振ケース（ ）内は実験時の呼称

加振ケース	基本波形	入力倍率	目標応答層間変形角	実層間変形角
Run.1 (1-5)	東京観測波	100%	1/200	1/234
Run.2 (2-2)		200%	1/100	1/137
Run.3 (2-6)		300%		1/86
Run.4 (3-2)	津島波	150%	1/50	1/64
Run.5 (3-5)		200%		1/35

表-2 モード境界周波数

	境界次数	Run.1	Run.2	Run.3	Run.4	Run.5
初期モード境界	0-1次	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	1-2次	3.34	2.91	2.67	2.08	1.95
	2-3次	7.74	6.43	5.65	5.12	3.35
	3-4次	10.90	8.87	8.17	7.73	7.41
最適モード境界	1-2次	1.68	2.05	1.11	1.41	2.19
	2-3次	5.70	4.84	3.59	6.38	2.31
	3-4次	9.19	7.40	8.17	7.28	3.13 (Hz)

4. 応答推定手法の実験への適用と妥当性についての検討（推定結果と精度の検証）

4.1 実験による最適モード境界周波数の検討

2.2節において、フィルタリング時における最適モード境界周波数の設定方法について述べたが、表-2にそのモード境界周波数の設定結果を、図-5にRun.1, Run.3, Run.5における初期モード境界と最適モード境界の設定周波数を示す。ここで、初期モード境界周波数とは予めフーリエスペクトルから定めたものであり、概ね各モードの谷の位置に設定している。図-5からもわかるように、最適モード境界周波数はほとんどの

位置において初期モード境界周波数に比べ値が小さくなった。しかし図を見ると、Run.1 と Run.3 はどちらも最適モード境界周波数が初期モード境界周波数に比べ低次モード側に近づいているが、Run.5 は1-2次モード境界で若干高次モード側に近づいており、また各モード境界周波数がほぼ同じ値となっている。これについては、Run.5 ではすでに降伏し塑性化しているため、高次モードの与える割合が大きくなったなどの原因が考えられるが、2次モードの範囲が極端に小さくなっていることについては今後の検討が必要である。

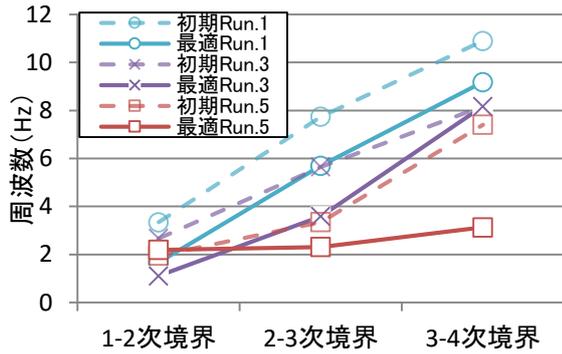


図-5 初期モード境界と最適モード境界

4.2 実験への適用による推定手法についての検討

図-6, 7, 8 に Run.1, 観測点数 4 個の場合における線形補間・スプライン補間・モード形それぞれによる応答推定結果を示す。本検討では、観測層は間隔を一定としたセンサの配置を想定している。線形、スプライン補間ではすべての観測点を通るように推定を行っているが、モード形推定については前述したように最小二乗法により誤差が最も小さくなるように推定を行っているため、観測層であってもモード形推定によって算出された値を用いることとする。

(1) 観測点数による推定手法精度の比較・検討

相対変位の推定誤差は、1層あたりの観測値に対する推定値の平均誤差割合 r_D を次式で設定し、推定精度の評価指標とする。

$$r_D = \left(\sum_{n=1}^n \sum_{i=1}^i |(D_{obi} - D_{esi}) / D_{obi}| \right) / n / Nl \quad (1)$$

D_{obi} : i 層における観測相対変位

D_{esi} : i 層における推定相対変位

Nl : 層数

n : 時刻歴のステップ数 (時間/サンプリング周波数)

絶対加速度の推定精度の評価指標も同様に次式により算出し、推定誤差割合 r_A を設定する。

$$r_A = \left(\sum_{n=1}^n \sum_{i=1}^i |(A_{obi} - A_{esi}) / A_{obi}| \right) / n / Nl \quad (2)$$

A_{obi} : i 層における観測絶対加速度

A_{esi} : i 層における推定絶対加速度

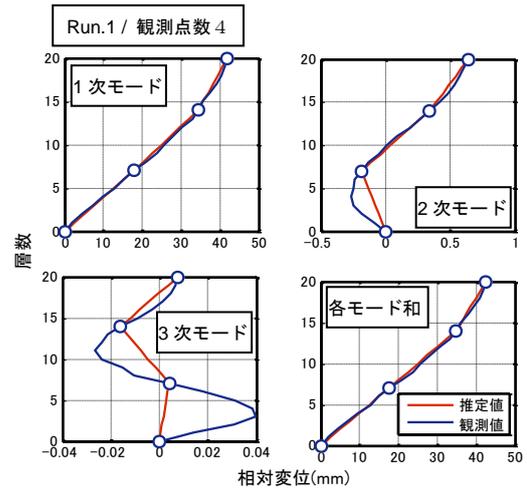


図-6 線形推定相対変位

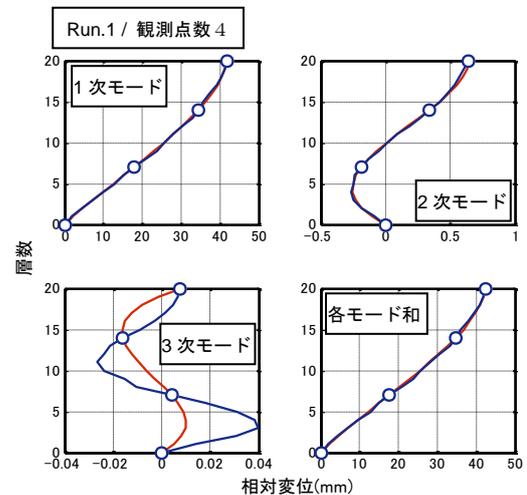


図-7 スプライン推定相対変位

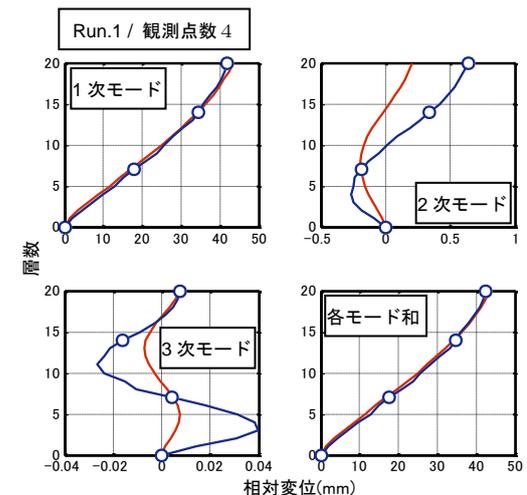


図-8 モード形推定相対変位

ここで、小変形領域において精度良く推定を行うのは非常に困難であるため、推定値の平均誤差割合は小変形領域 (本検討においては建物頂部の変形が 10mm 以下のステップを小変形領域と設定する) を取り除き、

推定誤差割合を算出している。また、被災度判定を行う上では層せん断力-層間変形角関係が重要となるが、本検討では縮小 20 層の実験において各層の質量がほとんど変わらず、また、相対変位を対象として推定を行っているため、相対変位と絶対加速度の推定値と観測値の誤差により応答推定精度を評価している。

図-9 に Run.1 における各推定手法での観測点数の変化による推定誤差割合の変動を相対変位、絶対加速度とともに示す。相対変位については観測点数が 2 個の地層と最上層のみを観測した場合についてモード形による推定の推定誤差割合が最も小さいことがわかる。観測点数が 3 個以上の場合は線形、スプラインによる補間がより精度良く推定できており、モード形による推定は観測点数が増えても推定誤差割合が減少しない。

また、絶対加速度についてもやはり観測点数が 2、3 個と少ないときにモード形 a) による推定が有用であることがわかる。線形とスプライン補間による推定にほとんど有意差はなく、モード形 b) の推定方法については観測点数に影響されず、ほとんど同様の値となる結果となった。

図-10、11 には Run.3、Run.5 における観測点数による推定誤差割合の変動を示す。相対変位については Run.1 と同様少数の加速度センサを用いた場合にモード形による推定誤差割合が小さいが、絶対加速度では推定した相対変位を二階微分することで算出したモード形 a) による推定誤差割合が過大となった。これは前述の通り、最小二乗法による時刻歴での相対変位の不連続性に起因している。応答が大きくなるほど絶対加速度を算出した際に出てくる特異値が応答の中に紛れ、特異値を除去しきれないために推定誤差割合が増大し推定精度が低下したと考えられる。したがって、観測波が大きく、建物の応答も大きくなる場合、加速度を直接推定する方が、精度向上を期待できるが、絶対加速度を算出する際の特異値の除去の仕方にも改良の余地があると考えられ、今後の検討が必要である。

(2) 最大層間変形・最大層せん断力に関する検討

図-12 に Run.1 における最大層間変形、最大層せん断力の推定結果として、観測点数 2、4、6 個の場合について示す。最大層間変形については線形で推定した場合、観測点間の変形割合が一定となるため層間変形が観測点間で様になり、観測点数が少数時の層間変形の推定には適さない。スプライン補間は観測点数 2 個の場合、補間が線形となるため線形補間と同様の傾向を示しているが、観測点数が増えるにつれ概ね最大層間変形を包括している。しかし、スプライン補間の場合層間変形が滑らかに出てしまう傾向にあり、最大層間変形のピークを抽出できない。これらに比べ、モ

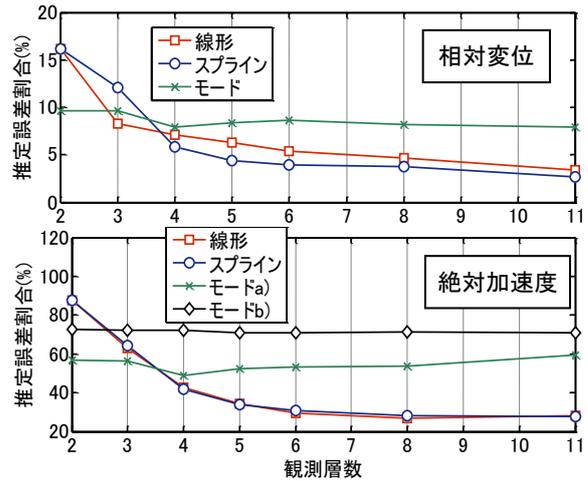


図-9 Run.1 推定誤差割合

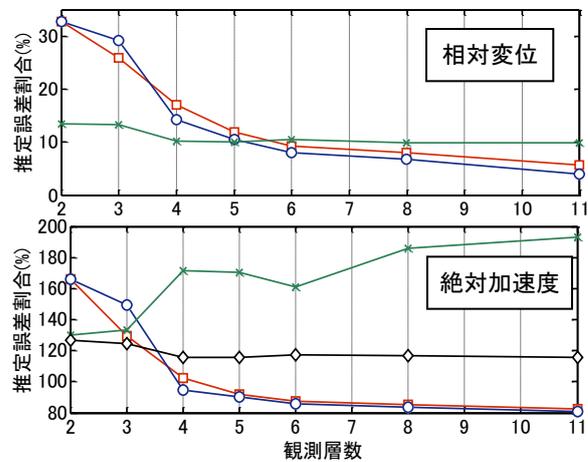


図-10 Run.3 推定誤差割合

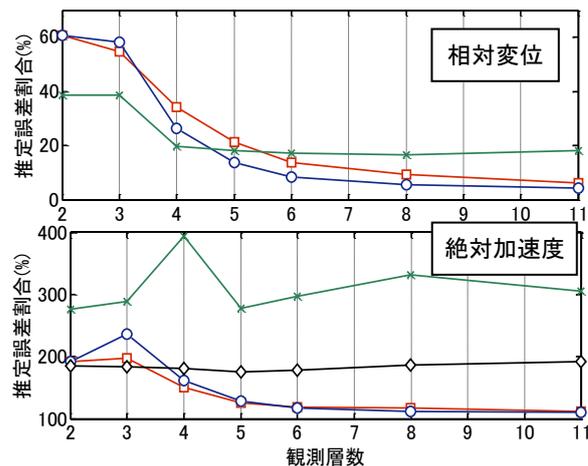


図-11 Run.5 推定誤差割合

ード形による推定は低層こそ観測値を下回っているが、観測点数が 2、4 個と少ない場合、層間変形を良く捉えられており、線形、スプライン補間に比べるとある程度最大層間変形のピークも捉えることを確認した。

最大層せん断力については全層の慣性力により足し上げられていることで値が均されているため、最も大

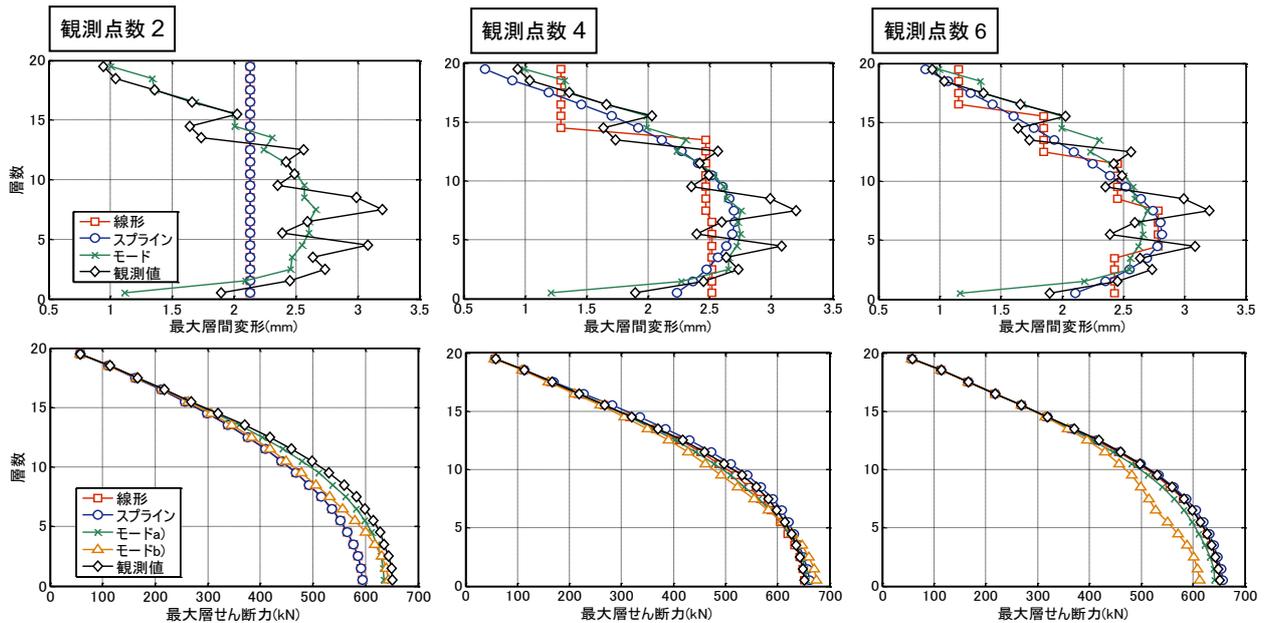


図-12 Run.1における最大層間変形（上段），最大層せん断力（下段）

きいところでも1割程度の誤差となっている。全体的に観測値をある程度捉えているが、観測点数が少数になるにつれモード形による推定が実際の観測値に最も近くなる結果となった。対して、観測点数を十分に確保できる場合については線形補間やスプライン補間の方が精度良く観測値を捉える結果になることを示した。

文献^{3),4)}でもモード形による推定から最大層間変形角の推定が可能であるという結果であることから、実建物の応答においても、少数加速度センサによる推定という点で既往の研究と同様の知見であると言える。

5. まとめ

縮小20層RC造試験体の振動台実験の結果から、センサ設置層の観測データから、非観測層の応答推定手法を提案し、全層の観測データとの比較を通し本手法の妥当性について検討した。以下に本研究から得られた知見を示す。

- 1) フィルタリングに際するモード境界の設定において、観測値に合うような境界周波数を算出する最適モード境界周波数による方法を提案した。
- 2) 対象とした実験において、非観測層の応答を推定する際、観測点数の少ない場合にはモード形推定が、観測点数の多い場合には線形補間やスプライン補間推定が有用であることが示された。
- 3) 最大層間変形、最大層せん断力についても観測点が少なくなるほどモード形推定の方が良い推定結果が得られる傾向が示された。最大層間変形のピークを捉える点に課題は残るが、全層の観測データによる結果と概ね整合しており、被災度判定への適用の可能性を示唆した。

謝辞

本研究で検討の対象に震動実験は平成23,24年度国土交通省建築基準整備促進事業（27-1長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討）の一環として実施されたものである。実験データは大林組よりご提供頂き、特に杉本訓祥氏にはデータ提供等で多大なご尽力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 梨本優也 ほか：縮小20層RC造架構の震動実験を用いた損傷推定手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.2，pp.259-264，2014
- 2) 梨本優也 ほか：中小地震観測データを用いたRC造建物の即時損傷推定と耐震性能評価手法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.2，pp.679-684，2015
- 3) 文部科学省 研究開発局，京都大学 防災研究所：3.2 建物の健全度モニタリングに関する研究開発，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 成果報告書，pp.165-168，平成26年5月
- 4) 小沢彩幸，三田彰：3 台の加速度センサを用いた高層建物の地震応答推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，2014年9月
- 5) 高橋大輔：数値計算，岩波書店，1996
- 6) (株)大林組 ほか：平成24年度国土交通省 建築基準整備促進事業：27-1：長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全検証方法に関する検討，平成25年3月