

# 論文 限られた加速度計の地震応答観測記録に基づく RC 造建物の層レベルの構造健全性評価に関する検討

大野 歩美\*1・易 卓然\*2・三浦 耕太\*3・前田 匡樹\*4

**要旨：**被災建物の継続使用の可否や余震に対する安全性を早急に判断するためには、地震発生前後での建物の構造特性の変化や地震発生時の建物の応答を正しく推定することが重要である。本研究では、多層 RC 造建物の限られた層に設置した加速度計の地震応答観測記録に基づき、建物の固有周期や各層の剛性の推移を推定する。また、推定した剛性に基づくモード形補間により各層の応答推定と損傷程度の評価を行う手法について検討する。2 質点系の解析モデルに手法を適用した結果、建物の固有周期と各層の剛性、応答変位を概ね正しく推定することができ、損傷発生階の特定とその程度の評価を行うことができた。

**キーワード：**構造ヘルスマニタリング、地震応答観測記録、固有周期、剛性、応答推定、損傷程度の評価

## 1. はじめに

地震発生後、被災建物の継続使用の可否や余震に対する安全性を早急に判断することは重要である。現状、建物の被災度を評価する方法である応急危険度判定<sup>1)</sup>や被災度区分判定<sup>2)</sup>では、技術者が一棟一棟建物の被災状況を目視で調査する必要があり、多大な労力と時間を要する。また、被災建物の中には簡単に立ち入ることのできない場所や、人の作業が難しい場所も存在するといった課題が挙げられる。そこで筆者らは、建物内に設置した加速度計の地震応答観測記録と等価 1 質点系に縮約した構造解析モデルによる復元力特性を使用して、建物全体レベルでの被災度判定や将来起こりうる地震に対する応答を予測する手法を検討してきた<sup>3)4)</sup>。本研究では、これらの研究成果を多層建物に展開し、建物内の限られた層に設置した加速度計の地震応答観測記録より、各層の応答や被災度を推定することを目的とする。各層の損傷の有無や程度を推定するためには、全層の地震応答観測記録があることが理想的であるが、本研究では一部の層の観測記録しか得られない場合でも、地震発生前後での構造特性の変化を正しく評価し、層レベルの被災度判定を可能とすることを目指している。よって本論文では、はじめに、鉄筋コンクリート造建物の損傷と大きく関係する固有周期と剛性について着目し、限られた層の地震応答観測記録を使用して地震発生前から地震発生後の建物の固有周期と各層の剛性の推移を正しく推定する方法について提案する。続いて、推定した剛性より建物各層の応答推定を行い、損傷程度の評価を行う手法について検討する。本検討では、2 質点系の解析モデルに適用することで、提案手法を検証する。

## 2. 各層の応答推定手法

本研究では、建物内の限られた層に設置した加速度計の地震応答観測記録より、建物の各次固有周期の推移を求め、求めた固有周期に基づき各層の剛性の推移を推定する方法を提案する。また、推定した剛性に基づくモード形補間により、建物各層の応答推定を行い損傷程度の評価を行う手法について検討する。推定手法の概要を図-1 に示す。ここでは、多層建物において設置できる加速度計は 1 階床（基礎）、中間階床、最上階床の 3 個に限られている場合を想定する。以下、提案手法の手順について述べる。

### 2.1 固有周期の抽出

地震発生時の 1 階床と各次モードの影響が最もみられる中間階床で観測した加速度記録に対して短時間フーリエ変換 (STFT) を行い、高次を含めた固有振動数を抽出する。図-1 (a), (b) に示すように、加速度記録を適切な時間 (窓) に区切り、各窓に対して 1 階床と中間階床のフーリエスペクトル比のピークを抽出することで、各時刻に対する固有振動数、及び、固有周期を図-1 (c) のように求める。

### 2.2 建物各層の剛性の推定手法

#### 2.2.1 各層の剛性（剛性分布）の候補の推定

2.1 で求めた各時刻の固有周期に対して、各層の剛性を推定する。ここで、設計時の各層の質量と剛性は既知であることを前提とする。本研究では、建物の損傷前の剛性（設計時の剛性）に対する各層の剛性の比を $\alpha_i$ （以降、 $\alpha_i$ を剛性低下率と呼ぶ）とし、2.1 で推定した固有周期 ( $T_{m_i}$ ) と剛性低下率 $\alpha_i$ を用いて計算する固有周期 ( $T_{cal_i}$ ) の誤差の 2 乗和の合計が最小となるような剛性

\*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 同済大学大学院 土木工学研究科 防災減災工学専攻 研究員 博士(工学) (正会員)

\*3 大林組技術研究所 博士(工学) (正会員)

\*4 東北大学 グリーンクロステック研究センター／工学研究科都市・建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

低下率の組み合わせを求めることとする。ここで使用する誤差の求め方を式(1)に示す。このとき、剛性  $K_i$  から剛性マトリクスを作成して固有周期  $T_i$  を求めることは可能である一方で、図-1 (d) の例に示すように、固有周期  $T_i$  から剛性  $K_i$  は一意には求まらず、複数の組み合わせが求まることもある。

$$\text{周期 } T \text{ の誤差} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{m_i} - T_{cal_i})^2} \quad (1)$$

n : 次数

### 2.2.2 適切な剛性分布の選定

前述のように、式(1)により求める固有周期  $T_i$  の誤差の合計が最小となる建物の各層の剛性低下率は複数求まる場合があることから、実建物の状態と一致する正しい剛性分布を選択する必要がある。

すでに建物の剛性低下が発生している場合には、剛性が回復し、剛性低下率が大きくなる組み合わせは現実的ではないことから、過去の地震応答観測記録にも同様に提案手法を適用することで得られる推移を参考に、非現実的な組み合わせを除外することができる。

上記以外の場合には、各モードの形状を用いることで最も適切な剛性低下率の組み合わせを選定することとする。最大応答加速度の分布には各モードの形状（刺激関

数）が大きく影響すると考えられる。複数求まる剛性低下率の組み合わせからは、図-1 (d) に示すようにそれぞれ異なる振動モード形（刺激関数）が得られるため、最大応答加速度の分布が異なる。よって、加速度計を設置した階床の応答加速度の観測記録と、各モードの組み合わせから推定した応答加速度が一致、または、より近くなる剛性分布を選定すれば良い。各振動モードにより大きな差が生じる中間階床に加速度計を設置し観測記録を比較することで、効率的に適切な剛性分布を選定することができると考えられる。

### 2.3 建物各層の応答推定と損傷程度の評価

2.2 で推定した各層の剛性と加速度記録から層せん断力-層間変位関係を求め、地震時の各層の損傷程度の評価を行う。図-1 (e) に示すように、時刻歴中の各ステップについて、層せん断力  $Q_i$  と剛性  $K_i$  から最上層の層間変位  $\delta_i$  を求める。続いて、2.2 で推定した剛性分布から算出したモード形（刺激関数）を、最上層の層間変位が  $\delta_i$  となるように係数倍（モード形補間）することで、非観測層を含む各層の変位を推定する。また、求めた層間変位に剛性を乗じることで、各層の層せん断力を推定する。

以上より推定した層せん断力-層間変位関係により、図-1 (f) に示すように建物各層の損傷程度を評価する。

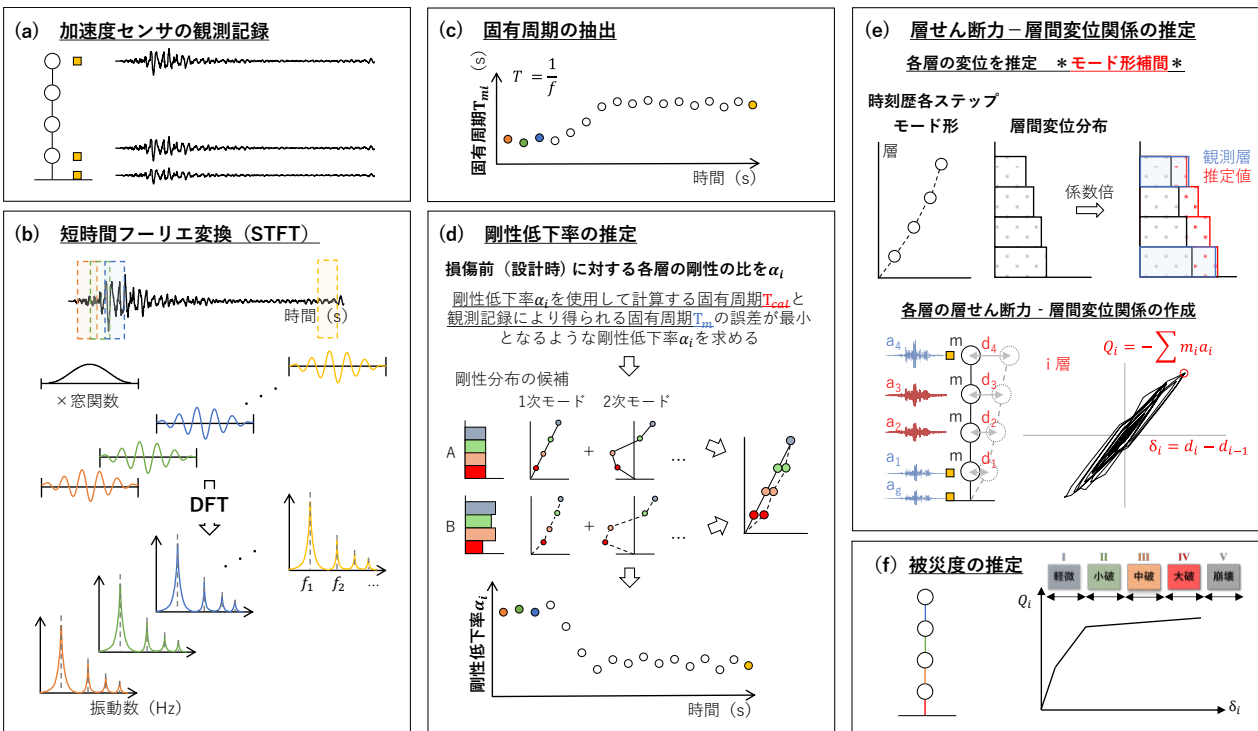


図-1 応答観測記録に基づく各層の被災度推定のフロー

### 3. 検討に使用する解析モデル

本検討においては、解析モデルを実際の建物に見立て、時刻歴応答解析結果を建物に設置した加速度計から得られる地震応答観測記録として、提案手法の検証を行う。

本検討では2質点系の解析モデルを使用する。解析モデルは表-1に示すように各層の質量と剛性が等しく、1次固有周期は0.5秒となるように設定した。また、復元力特性は各層とも図-2に示す武田モデルであり、粘性減衰は瞬間剛性比例型(減衰定数0.03)として設定した。地震波は図-3に示す東北地方太平洋沖地震(JMA 宮城県涌谷町新町)のNS方向<sup>5)</sup>とし、本検討では3つの地震規模を想定して、モデルのいずれの層の応答も弾性応答、いずれかの層がひび割れ後降伏前の応答(以降、ひび割れ応答と呼ぶ)、及び、降伏後の応答(以降、塑性応答と呼ぶ)となるように入力加速度倍率を調整して使用する(表-2)。地震発生後の建物の固有周期や剛性低下率、応答については、地震応答解析結果の層せん断力-層間変位関係から求める値を正解値とし、提案手法による推定結果を検証する。瞬間剛性の平均値より求めた各ケース各区間の剛性低下率と、対応する固有周期の正解値を表-3に示す。

表-1 解析モデルの概要

層	質量(ton)	初期剛性(kN/mm)
1	400	160
2	400	160

表-2 入力地震動倍率

応答(層塑性率)	入力加速度倍率
弾性(0.04)	0.02
ひび割れ(0.23)	0.15
塑性(1.53)	0.40

表-3 固有周期と剛性低下率の正解値

応答	次	固有周期(s)			剛性低下率			
		前	中	後	層	前	中	後
弾性	1		0.508		1		1.00	
	2		0.194		2		1.00	
ひび割れ	1	0.508		0.588	1	1.00		0.68
	2	0.194		0.203	2		1.00	
塑性	1	0.508	0.753	0.839	1	1.00	0.43	0.34
	2	0.194	0.272	0.293	2	1.00	0.54	0.48

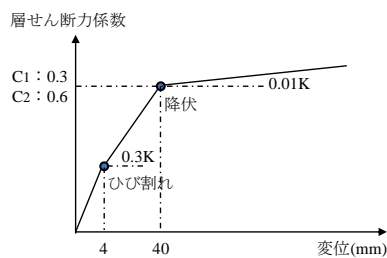


図-2 各層の復元力特性

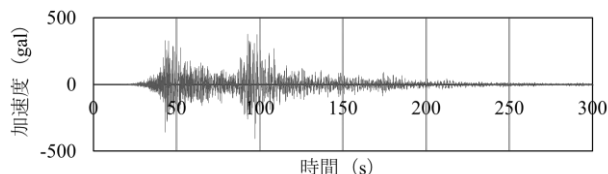


図-3 検討に使用する地震波  
(東北地方太平洋沖地震, 宮城県涌谷町新町, NS方向)

### 4. 提案手法の適用結果

#### 4.1 固有周期の推定結果

弾性応答、ひび割れ応答、塑性応答となる3つのケースについて、短時間フーリエ変換を行った結果を図-4に示す。本検討においては、窓幅は5.12秒(建物の固有周期の数倍)、移動ステップを1.28秒とし、各窓に対して窓関数(ハニング窓)を掛け合わせたのち、分解能の向上のために末尾に0を追加し<sup>6)</sup>、20.48秒のデータにしたうえでフーリエ変換を行った。図-4では、各窓のフーリエスペクトル比の最大値を1に基準化した結果を示している。弾性応答の場合には1次固有振動数で2Hz程度、2次固有振動数で5Hz程度にピークが生じていることが読み取れる。またひび割れ応答の場合には、40秒付近で1次固有振動数が2Hzから1.6Hz程度に変化していることがわかる。その時刻の1階の層間変位を見ると、変位はひび割れが生じる4mmを超えており、建物に損傷が生じた時刻と周期に変化が生じている時刻が同じであることが確認できる。同様に、塑性応答についても1次固有振動数が40秒付近で2Hzから1.3Hz程度に、100秒付近で1.1Hz程度に変化していることがわかり、それぞれの時刻で1階の層間変位はひび割れが生じる4mm、降伏が生じる40mmを超えていることが確認できた。図-4について、各窓のピークを拾うと固有周期は図-5に示すような結果となった。正解値の破線と比較すると、本検討で使用した解析モデルの場合には、地震発生前から地震発生後での固有振動数の変化を正しく捉えることができていると考えられる。

#### 4.2 建物各層の剛性の推定結果

本検討においては、剛性低下率 $\alpha_i$ の範囲は0.01~1.30で0.01刻みとし(推定誤差を考慮して $\alpha_i > 1$ を含める)、使用する固有周期はばらつきを低減するため、4.1で推定した結果を移動平均により平滑化したものとする。

##### 4.2.1 各層の剛性(剛性分布)の候補の推定結果

4.1で求めた固有周期の移動平均に対応して、弾性応答、ひび割れ応答、塑性応答について剛性低下率を算出した結果を図-6に示す。すべての結果において、瞬間剛性の算出結果は上下する傾向が見えるが、これは履歴ループと短時間フーリエ変換を行う際の窓幅に起因していると考えられる。弾性応答では1層、2層ともに剛性低下率は1程度、ひび割れ応答では1層の剛性低下率が



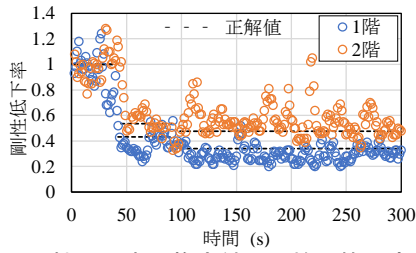


図-7 剛性低下率の推定結果（検討範囲変更後）

### 4.3 建物各層の応答推定と損傷程度の評価

4.2で求めた剛性低下率の推移に対応して、弾性応答、ひび割れ応答、塑性応答の3つのケースについて各層の層せん断力-層間変位関係を推定した。紙面の都合上、その結果を層間変位にのみ着目して図-8に示す。なお、本検討においてモード形補間は、1次モードのみを使用して行った。

図-8より、変位が大きくなるにつれて推定誤差が大きくなる傾向がみられるものの、弾性応答、ひび割れ応答、塑性応答のいずれにおいても概形は評価できており、特に弾性応答については比較的精度良く推定を行うことができた。ひび割れ応答、塑性応答では応答変位が大き

くなるにつれて推定誤差が大きくなる傾向が見られるが、その原因の1つに、今回の手法では減衰の考慮を行っていないことが挙げられる。この点については今後の検討課題としたい。図-9には、建物の頂部変位が最大となる時刻のモード形補間結果を示す。3つのケースについて、いずれの層においても誤差15%程度以内で推定ができていくことがわかる。本検討に使用しているモデルは層間変位4mmでひび割れ、40mmで降伏が生じるが、推定結果は弾性応答では1層、2層ともに4mm未満（弾性）、ひび割れ応答では1層の層間変位が4mm以上40mm未満（ひび割れ後降伏前）、塑性応答では1層の層間変位が40mm以上（降伏後）、2層の層間変位が4mm以上40mm未満（ひび割れ後降伏前）と正解と一致する範囲での推定となっており、損傷の程度についても概ね正しく評価できたと考えられる。

以上より、本検討に使用したモデルについては、提案手法により地震発生時の建物各層の応答を推定することができ、損傷程度の評価が可能であることを示すことができた。

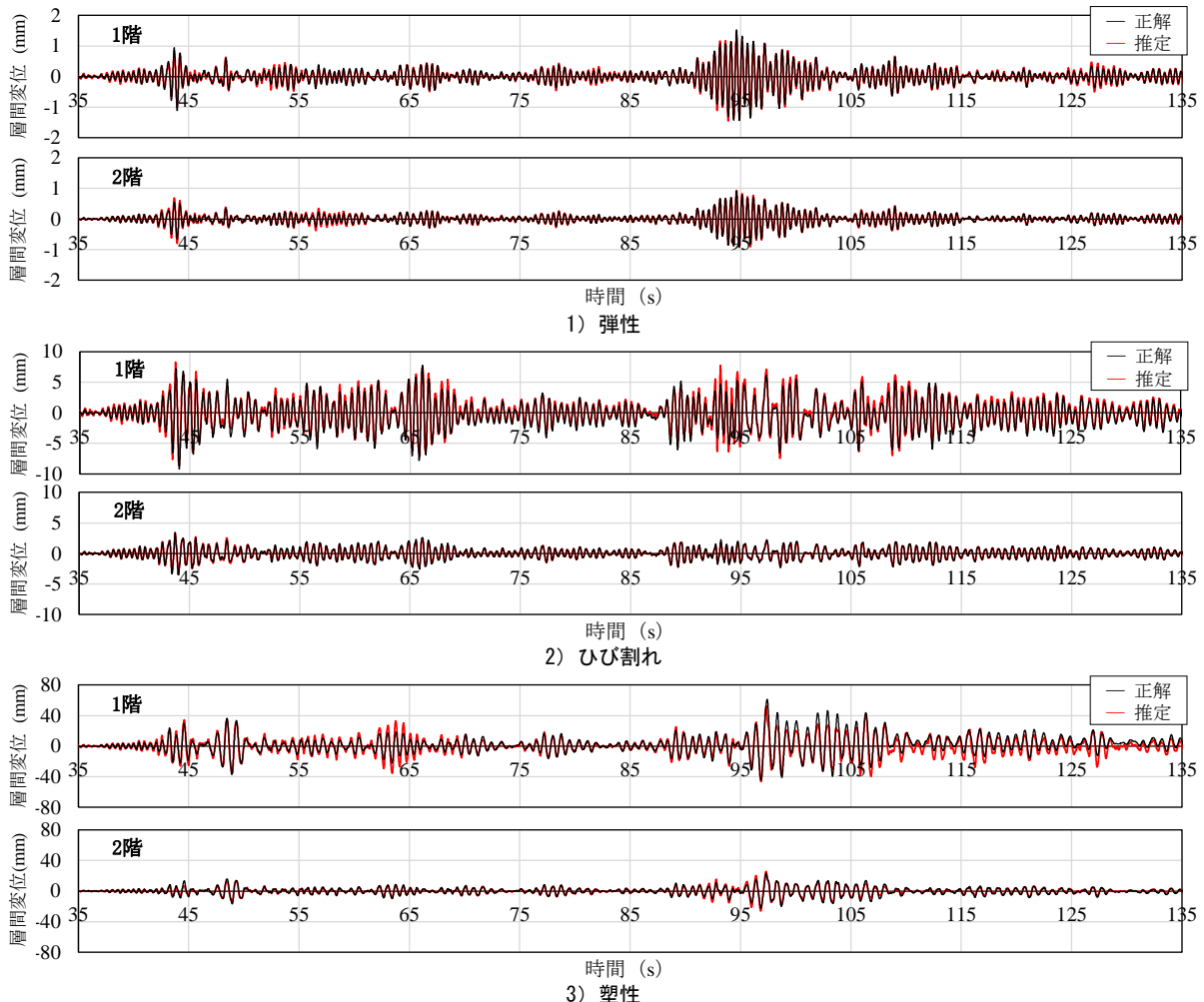


図-8 層間変位推定結果（35秒～135秒抜粋）

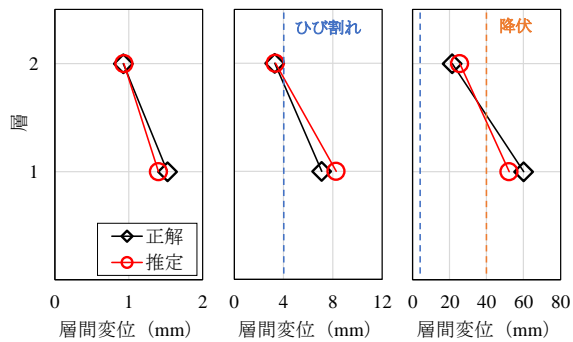


図-9 層間変位の推定結果  
(建物頂部変位最大時)

## 5. まとめ・結論

本研究は、鉄筋コンクリート造建物の限られた層に設置した加速度計による地震応答観測記録を用いて、層レベルの応答や損傷程度を評価する手法を検討することを目的とし、建物の損傷と大きく関係する固有周期と剛性低下率の推移を正しく推定する方法について提案した。また、推定した剛性低下率の推移より、建物各層の応答推定を行い損傷程度の評価を行う手法について検討を行った。2 質点系の解析モデルを用いて提案手法を検証したところ、以下の結果を得た。

- (1) 固有周期の推移については、1 階床と中間階床の地震応答観測記録を短時間フーリエ変換することで、弾性応答、ひび割れ応答、塑性応答のいずれにおいても概ね正しく推定することができた。
- (2) 推定した固有周期の移動平均から各層の剛性低下率を推定すると、その傾向を正しく推定できることが確認できた。1 組の固有周期に対して、複数の剛性低下率が求まる場合が存在するが、その場合には剛性低下率の推移やモード形を考慮することで剛性分布を 1 つに決定することができた。
- (3) 推定した剛性低下率の推移から各層の層間変位を算出すると、地震動の規模が大きくなるにつれて推定誤差は大きくなる傾向が見られるものの、その概形は評価できており、最大応答についても概ね正しく推定することができた。

以上(1)、(2)、(3)より、短時間フーリエ変換により高次を含めた固有周期を抽出することで、建物各層の剛性低下率と応答を推定することができ、損傷発生階とその程度の評価が概ね可能であることを示すことができた。今後は、より多層のモデルに対しても手法を適用することで、提案手法の適用範囲の検討と拡張を行うことを目標とする。

## 謝辞

本研究は、英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業「建屋応答モニタリングと損傷イメージング技術を活用したハイブリッド型の原子炉建屋長期健全性評価法の開発研究」(課題番号: JPJA21P21458909, 研究代表者・前田匡樹)の助成を受けたものです。また、本研究の一部は、東北大学と東京電力ホールディングス株式会社 福島第一廃炉推進カンパニーとの共同研究「福島第一原子力発電所廃炉に資する研究・開発」において実施されたものです。本論文の作成にあたり、建築研究所 関松太郎氏には多大なるご助言を賜りました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本建築防災協会: 被災建築物応急危険度判定マニュアル, 1998.1
- 2) 日本建築防災協会: 2015 年改訂版 再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2016.3
- 3) 大野 歩美, 易 卓然, 前田 匡樹, 鈴木 裕介: RC 建造物の構造健全性評価のための観測記録に基づく性能曲線の補正法と性能曲線を用いた被災度区分判定法の検討, コンクリート工学年次論文集, 第 45 巻第 2 号, pp.223-228, 2023
- 4) Zhuoran YI, Ayumi OONO, Jonathan MONICAL, Masaki MAEDA and Matsutaro SEKI: UPDATING OF PERFORMANCE CURVE OF AN EQUIVALENT SINGLE-DEGREE-OF-FREEDOM SYSTEM AND DAMAGE LEVEL CLASSIFICATION BASED ON SEISMIC, 構造工学論文集, Vol.70B, pp.41-48, 2024
- 5) 気象庁ホームページ: 強震波形 (平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震), [https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/110311\\_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html](https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html) (閲覧日 2024 年 7 月 8 日)
- 6) Matthew Lamb, Vincent Rouillard: Assessing the Influence of Fourier Analysis Parameters on Short-Time Modal Parameter Extraction, Journal of Vibration and Acoustics, JUNE 2012, Vol. 134