地震観測記録に基づく建築構造物の上下方向 1 次振動特性

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF THE FIRST-MODE VERTICAL VIBRATION OF BUILDINGS BASED ON EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS

木下 拓也^{*1}, 中村 尚弘^{*2}, 鹿嶋 俊英^{*3}

Takuya KINOSHITA, Naohiro NAKAMURA and Toshihide KASHIMA

This paper focuses on the first-modal natural period and damping ratio of buildings in the vertical direction. Auto regression and exogenous (ARX) model is used to identify the vertical natural period and damping ratio. The targets are earthquake observation records of 18 buildings consisting of reinforced concrete (RC), steel and reinforced concrete (SRC), and steel (S) structures. The identified values are summarized for each structural type, and its characteristics are discussed in view of the input amplitude and the height of buildings and in comparison with its natural period and damping ratio in the horizontal direction.

Keywords : Vertical Natural Period, Vertical Damping Ratio, Amplitude Dependency, RC & SRC Buildings, S Buildings, ARX model

上下方向固有周期, 上下方向減衰定数, 振幅依存性, RC・SRC 造建物, S 造建物, ARX モデル

1. はじめに

構造物の周期特性及び減衰特性は、建物の耐震設計や耐風設計に大きな影響を及ぼす重要な要素であるが、今日においても不明な点が多い。2011 年の東北地方太平洋沖地震（以下 3.11 地震）では、広範な地域において多くの地震観測記録が得られ、それらを元に、建築物の振動特性について多くの分析結果が報告された^{例え ば 1)~3)}。近年では、固有周期及び減衰定数について、その振幅依存性や損傷依存性、或いは経年変化と結び付けた研究が数多く発表されている^{4)~7)}。しかしながら、これらの報告の多くは水平方向の振動特性に限られており、上下方向振動特性について、種々の構造形式及び複数の建物について包括的に観測記録を分析し、その特徴を検討した事例は極めて少ない。

構造物の上下方向振動特性が、これまでそのような検討対象となつてこなかった経緯として、地震動の上下成分が水平成分に比して小さいこと、また建物の破壊が主として水平振動に起因すること等が考えられる。一方で、免震構造や超高層建物のような性能評価を必要とする構造物の耐震設計においては、複数の検討項目で、水平動による応答に加えて上下動の影響を考慮した検討を行うことが一般的となっている。積層ゴム系免震装置の面圧の検証はその代表的な事例であるが、その他にも、ロングスパン大梁の設計において上下震度を考慮して 3 ヒンジが生じないことを確認する、或いは柱の軸力比検討において長期荷重を割り増す等、構造設計実務では様々な状況で上下動の影響を適切に考慮することが求められている。

設計において上下動の影響を考慮する際には、免震装置面圧の検討における 0.3G（G は重力加速度を示す）や、2m を超える跳出し部材における 1.0G のように、慣用的な上下方向震度を用いることが多いが、慣用値の範囲を逸脱すると考えられる場合や、慣用値の妥当性を確かめる目的で、応答解析により震度を算定するケースもしばしば見受けられる。このような場合には、上下方向の応答解析モデルを作成することになるが、前述の通り各種構造形式についての上方向固有周期のデータは少なく、固有値解析結果からモデルの妥当性検証を行うことが困難なものとなっている。同様に 1 次減衰定数についてのデータも不足しており、応答解析結果に大きな影響を与えると考えられる減衰定数の設定についても、科学的根拠を見出しにくいのが現状である。

このように、構造物の上下方向振動については、その特性の考察や耐震性への影響、引いては耐震設計上の取り扱い等、幅広い検討が求められていると言える。そこで本報では、そのような検討の嚆矢として、構造物の上下振動の実現象の把握を目的に、RC 造・SRC 造・S 造といった種々の構造形式からなる計 18 棟の建物の強震観測記録に基づいて、上下方向 1 次固有周期及び 1 次減衰定数を同定し、その特性について検討する。著者らはこれまで、国立研究開発法人（国研）建築研究所による強震観測で得られた地震記録⁸⁾を対象として、文献 5 で RC 系建物、文献 6 で S 造建物の水平方向振動について、その振動特性や振幅依存性の分析を行ってきた。本報はそれらに続いて、上下方向振動を対象とした分析を行うものである。

^{*1} 竹中工務店技術研究所 研究主任・博士(工学)

^{*2} 広島大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

^{*3} 建築研究所 研究員・博士(工学)

Assoc. Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr.Eng.
Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Dr.Eng.
Research Engineer, Building Research Institute, Dr.Eng.

Fig.1 Typical building to be discussed in this study

まず 2 章において、構造物の上下方向振動についての既往の研究と本報の位置づけについて述べる。3 章では、分析対象とする建物についてまとめ、さらに ARX モデルを用いた上下方向振動特性の同定手法について詳述する。4 章では、全建物の同定結果を概観し、入力加速度振幅と建物高さの観点から分析する。続いて 5 章では、上下方向 1 次固有周期の定性的傾向について、縮約 1 自由度系の等価固有周期に基づく検討を行う。6 章では、同定した上下方向振動特性を、文献 5,6 で示した水平方向振動特性と比較し、その違いや相関関係について考察する。

2. 構造物の上下振動に関する既往の研究と本研究の位置付け

我が国の建築構造物の周期特性及び減衰特性について、包括的な検討を行った事例として文献 9 がある。同書第 5 章では、豊富な観測的事実に基づいて、RC 系建物及び S 造建物の微小振幅レベルでの水平方向 1 次固有周期 ${}_hT_1(\text{sec})$ と建物高さ $H(\text{m})$ の関係、及び水平方向 1 次減衰定数 ${}_h h_1$ と ${}_h T_1$ の関係について、下式を示している。

$${}_h T_1 = 0.015H \text{ (RC 系)}, \quad {}_h T_1 = 0.02H \text{ (S 造)} \quad (1)$$

$${}_h h_1 = 0.014 / {}_h T_1 \text{ (RC 系)}, \quad {}_h h_1 = 0.013 / {}_h T_1 \text{ (S 造)} \quad (2)$$

ここで、周期 T 及び減衰定数 h の左下添え字は方向を表し、水平方向は h とし、以降で上下方向特性を表す際は v とする。右下添え字は次数を表す。上式より、水平方向 1 次減衰定数 ${}_h h_1$ と建物高さ H の関係については下式で表せる。

$${}_h h_1 = 0.93/H \text{ (RC 系)}, \quad {}_h h_1 = 0.65/H \text{ (S 造)} \quad (3)$$

しかしながら、同書においても上下方向の周期や減衰に関する記述はほとんど無く、(1)-(3)式のような上下方向振動の定性的性状を表すような指標は示されていない。なお同書では、上記のように RC 造と SRC 造を一括して RC 系建物として扱っており、本報もそれに倣って構造種別を RC 系建物と S 造建物の 2 種類に大別し分析を行うものとする。

既往の構造物の上下方向振動に着目した研究としては、免震建物を対象とした応答評価手法の検討が多く挙げられる¹⁰⁻¹⁴⁾。上下振動は水平振動に比して高振動数となることから、動的相互作用に着目した永野らの検討¹⁰⁾や、地盤ばねを含めた簡易評価モデルを示した木下らの検討¹¹⁾があるが、これらの検討はいずれも、地震観測を実施している特定の建物を対象とした検討に留まっている。

一方横田ら¹⁵⁾は、S 造超高層建物の振動特性を分析する中で、5

(a) Whole buildings

(b) Buildings in Kanto Area

Fig.2 Location of target buildings

棟の超高層建物の地震時の上下方向 1 次固有周期 ${}_v T_1$ と階数 N の関係について下式を示した。

$${}_v T_1 = 0.0084N + 0.065 \quad (22 \leq N \leq 55) \quad (4)$$

井川^{16),17)}らは、2011 年の 3.11 地震で得られた地震観測記録に基づいて、2 棟の超高層 RC 建物の上下方向周期を求め、解析的な検討を行った。また永野ら¹⁸⁾は、3.11 地震時の 7 棟の超高層 RC 建物の建物高さ H と上下方向 1 次固有周期 ${}_v T_1$ と水平方向 1 次固有周期 ${}_h T_1$ との関係について下式を示した。

$${}_v T_1 = 0.00173H \quad (70 \leq H \leq 105) \quad (5)$$

$${}_v T_1 = 0.117 {}_h T_1 \quad (1.1 \leq {}_h T_1 \leq 1.9) \quad (6)$$

(4)-(6)式のような、上下方向振動特性の定性的傾向を示した事例は少なく、特に(6)式のように水平方向と比して表現した例は非常に珍しい。以上のように、複数建物を俯瞰した上下方向振動特性については、限られた事例は見られるものの未だ十分な議論がなされていない状況である。

本報は、種々の構造形式からなる計 18 棟の建物から得られた、長期にわたる地震観測記録に基づいて、上下方向振動特性を同定し、その分析を行った点に特徴がある。Fig.1 に、本報で対象とする、地震観測を実施している構造物を模式的に示す。対象構造物は、建物の下部（1 階ないし地下階）及び頂部（上層階ないし屋上階）の少なくとも 2 か所で地震観測を行っている。この観測記録を用い、下部記録を入力、頂部記録を出力とした時系列モデルにより、上下方向 1 次固有周期 ${}_v T_1$ 及び上下方向 1 次減衰定数 ${}_v h_1$ を同定する。従って、推定される振動特性は、構造物の下部観測点から頂部観測点の間に存在する柱等の鉛直部材、及び梁・スラブ等の水平部材の振動に由来するものとなる。同定された上下方向振動特性について、構造種別や建物高さ、水平方向振動特性との関係を示す。これらの結果は、これまでほとんど示されてこなかった、構造物の上下方向全体 1 次モードの周期及び減衰定数の定性的傾向を示す資料となるものと考えられる。

3. 振動特性分析手法

3.1 対象建物

対象とする観測記録は、(国研) 建築研究所による強震観測で得られた地震記録⁸⁾である。RC 系建物 9 棟 (RC 造 4 棟・SRC 造 5 棟)、及び S 造建物 9 棟の計 18 棟を検討の対象とする。観測建物の概要を Table1 に、観測建物の位置を Fig.2 に示す。建物の多くは関東にあり、一部が東北、北陸及び近畿に所在する。これらの建物は概ね

Table 1 List of target buildings

No.	Code	Location	Structure	Floors	Height(m)	Year of Construction	Year of Observation Start	No. of Records	Lower Observation Floor	Upper Observation Floor
		所在地	構造形式	階数	高さ(軒高)	竣工年	観測開始年	観測地震波数	下部観測点	上部観測点
1	FNB	Chiba	RC	8F	24.5	1987	1996	264	1F	8F
2	NIG	Niigata	RC	6F+B1F	26.5	—	1964	57	B1F	RF
3	NIT	Saitama	RC	6F	21.0	1995	1998	443	1F	6F
4	YCY	Chiba	RC	6F+B1F	28.0	1976	1996	32	B1F	RF
5	CHB	Chiba	SRC	8F+B1F	30.7	1993	1996	29	B1F	8F
6	IWK	Fukushima	SRC	8F+B1F	34.3	1973	1981	432	B1F	9F
7	MST	Saitama	SRC	7F+B1F	21.0	1983	1996	272	1F	7F
8	TDS	Saitama	SRC	8F+B1F	31.5	1970	1996	337	B1F	8F
9	UTK	Tokyo	SRC	9F+B2F	21.7	1968	1996	60	1F	7F
10	CG2	Tokyo	S	21F+B4F	95.5	2001	2003	553	B4F	21F
11	CGC-B	Tokyo	S	20F+B3F	86.5	1994	1994	130	1F	20F
12	CGC-C	Tokyo	S	20F+B3F	86.5	1994	1994	130	1F	19F
13	CHP	Chiba	S	20F+B2F	95.5	1996	2014	33	B1F	19F
14	KWS	Kanagawa	S	7F	27.1	1994	1996	15	1F	7F
15	OSK	Osaka	S	15F+B3F	66.2	1974	1973	14	B3F	RF
16	SMD	Tokyo	S	19F+B2F	84.7	1990	1996	16	B1F	RF
17	SND	Miyagi	S	15F+B2F	84.7	1990	1996	202	B2F	15F
18	YKH	Kanagawa	S	23F+B3F	96.6	1996	1995	181	B2F	23F

庁舎・役所として供用されており、用途としては事務所に分類される。観測の開始時期は各建物により異なるが、1990年代半ばのものが多く、いずれの地点においても、観測開始から2014年7月までに得られた観測記録を用いる。観測地震波数は、最小で14波、最大で553波と幅がある。各建物の下部観測点は1階ないし地下階であり、上部観測点は概ね最上階ないし屋上階となっている。なお、建物自体の特性を判断するため、免震構造は対象としていない。また、観測開始後に耐震改修を行った建物も除外した。

3.2 ARXモデルによる周期及び減衰の同定

振動特性の同定は、文献5における手法に準じて行う。はじめに、各建物の頂部と下部の上下方向加速度記録を振動数領域で除することにより、頂部／下部の伝達関数を算定する。次に、伝達関数の形状から、1次のピークを捉えた台形フィルタを設定する。フィルタ処理した観測波形を用いて、下部記録を入力、頂部記録を出力とした次数2の1入力1出力のARXモデルにより、1次の固有周期及び減衰定数を同定する。ARXモデルによる1回の同定区間は20秒間、試行のピッチを5秒として、各建物で得られた全ての観測地震波に対して同定を実施する。1つの観測地震波の末尾で、区間が20秒に満たない場合には同定を行わない。例えば、ある観測波が30秒間の記録であった場合、0～20秒、5～25秒と区間を5秒ずつずらし、合計3回の同定を行う。こうすることで、1つの観測波からでも、振幅の大小による振動特性への影響を考慮することができる。同定時に、同じ区間の下部観測点における上下方向加速度の二乗平均平方根(RMS) $A_{RMS}(\text{Gal})$ を算定し、振幅の大きさを計る指標として利用する。1つの建物に対して、全地震波分の同定を実施した後、それらの結果を3.11地震とその前後に分け、それぞれについて、加速度 A_{RMS} の対数軸と周期・減衰の実数軸上での回帰直線を算定する。これらを建物ごとの代表値とし、建物間の比較や3.11地震前後の比較に用いる。

本報で用いる同定手法の特徴は、事前のフィルタ処理により、ARXモデルの次数を2次に固定していることである。各同定における次数調整が不要となり、かつ求解も高速化されることで、18建

物で観測された延べ3,000を超える地震波を対象とした振動特性分析を、効率的に実施することができた。同定精度についても、文献19において、本手法が他手法と比較して良好な精度を有することが確認されている。

3.3 検討事例

分析の例として、RC系建物としてIWK(SRC造)、S造建物としてCGC-Cを取り上げ、一連の同定経過を示す。Fig.3に、2つの建物について算定した上下方向の頂部／下部の伝達関数と、設定した台形フィルタ区間を併せて示す。フィルタ処理を施した観測波に対して、区間20秒・ピッチ5秒ごとに1次の固有周期及び減衰定数をARXモデルにより同定した。2つの建物について、同定した上下方向1次固有周期 νT_1 及び減衰定数 νh_1 を縦軸とし、対象区間における建物下部観測点の上下方向加速度RMS値 $A_{RMS}(\text{Gal})$ を横軸にプロットしたものをFig.4,5にそれぞれ示す。Fig.4では、次章以降で各建物を横並びで比較するため、固有周期を建物高さ $H(\text{m})$ で除した基準化周期 $\nu T_1/H(\text{sec/m})$ としている。Fig.4,5には、各建物の同定結

Fig.3 The Upper/Lower transfer function in vertical direction

(a) SRC Building (IWK)

(b) Steel Building (CGC-C)

Fig.4 Correlation between period vT_1 and input acceleration A_{RMS}

果から、全観測地震動を 3.11 地震とその前後に分け、 A_{RMS} の対数軸と振動特性の実数軸上で線形回帰した直線も併せて示している。SRC 造の IWK が 3.11 地震前後で周期変化が見られるのに対し、S 造の CGC-C では見られない。また、減衰定数についていずれの建物も A_{RMS} に対して右上がりとなっており、緩やかな振幅依存性が確認できる。次章では、このような回帰直線を基に、構造種別ごとに複数の建物を総合した振幅依存性の検討を行う。

4. 同定された上下方向振動特性の特徴

4.1 周期及び減衰の入力振幅との関係

前章までで、対象とする 18 建物について、各建物の 3.11 地震前後の 1 次固有周期及び減衰定数の同定結果から、下部観測点の加速度 RMS 値 A_{RMS} (Gal) を入力振幅とした回帰直線を算定した。ここでは、それらの回帰直線を俯瞰し、振幅依存性について検討する。

算定した回帰直線を、RC 系建物及び S 造建物ごとにまとめて示したものを Fig.6,7 に示す。各図の横軸は A_{RMS} であり、縦軸は同定された上下方向 1 次固有周期 vT_1 (sec) または減衰定数 $v h_1$ である。図中の灰色で示した実線は個々の建物の回帰直線であり、両端丸印付きの実線はその平均値、その上下の黒の破線は $\pm 1.0\sigma$ の範囲を示す。上下方向 1 次固有周期 vT_1 は、建物高さ H (m) で除した基準化周期 vT_1/H (sec/m) として示す。基準化周期については、回帰直線の平均値は、RC 系建物で 0.004 sec/m 程度、S 造建物で 0.003 sec/m 程度で、概ね一定値となっている。特に S 造建物については、 A_{RMS} に対してほぼ水平な線となっており、振幅に依存する性質は認められない。Fig.6,7 の基準化周期を比較すると、RC 系建物では 3.11 地震前後でわずかに傾きの変化が見られるものの、RC 系建物・S 造建物とも大きな変化は見られない。

上下方向 1 次減衰定数 $v h_1$ については、特に RC 系建物の多くの回帰直線で、振幅が大きくなると減衰定数も大きくなる右上がりの傾向を示し、振幅依存が存在するように見える。S 造建物も、減衰

(a) SRC Building (IWK)

(b) Steel Building (CGC-C)

Fig.5 Correlation between damping ratio $v h_1$ and input acc. A_{RMS}

定数の値自体は小さいが、わずかに右上がりの傾向が見られる。回帰直線の平均値は、RC 系建物の A_{RMS} の小さい領域で 2% 程度、大きい領域では 4% 程度であった。S 造建物では、同様に 0.5~1% 程度であった。Fig.6,7 の減衰定数を比較すると、3.11 地震前後での回帰直線の平均値の違いは少ないものの、RC 系建物では、各建物のばらつきが増大する傾向が見られた。

4.2 建物高さと上下方向振動特性の関係

ここでは、対象とした建物群の高さと、同定した上下方向 1 次固有周期及び 1 次減衰定数の関係を、振幅レベルごとに整理し考察を加える。算定した回帰直線に対して微小振幅レベルと中振幅レベルに相当する加速度を定め、その時の各建物の周期及び減衰と建物高さの関係を示す。ここで、微小振幅レベルは下部観測点の加速度 RMS 値 $A_{RMS} = 0.02$ Gal、中振幅レベルは $A_{RMS} = 2.0$ Gal とした。これらの値は、Fig.6,7 の各回帰直線の算定範囲を逸脱しない範囲から、微小振幅については十分小さい加速度を、中振幅については微小振幅の 100 倍、かつ有感地震程度の加速度として選定した。元となる回帰直線は 3.11 地震前のものとした。ただし、3.11 地震後に観測を開始した建物 CHP については、地震後の回帰直線を用いた。

Fig.8 に、2 つの振幅レベルに対する、建物高さ H と上下方向 1 次固有周期 vT_1 の関係を示す。図中には、建物高さ H と上下方向 1 次固有周期 vT_1 の原点を通る線形回帰式を、RC 系建物、S 造建物それぞれについて実線及び破線で示す。また、本報の同定対象に含まれない高層 RC 造建物の参考値として、文献 16,17 に示されている地震時の上下方向 1 次固有周期を灰色の丸印でプロットした。Fig.8(a), (b) の両図の間に大きな違いはなく、回帰直線の傾きもほぼ同一となっている。これは、上下方向 1 次固有周期について振幅依存性が認められなかった 4.1 の結果と整合する。RC 系建物と S 造建物の回帰直線に着目すると、S 造の方が傾きが小さい。これは単位高さあたりの周期が RC 系建物より S 造建物の方が短いことを意味しており、やや疑問が残る。この要因として、RC 系建物の多くが高さ

(a) RC and SRC buildings

(b) Steel buildings

Fig.6 Normalized vertical natural period $\nu T_1/H$ and vertical damping ratio νh_1 against input acc. A_{RMS} (Before 3.11 Tohoku Earthquake)

(a) RC and SRC buildings

(b) Steel buildings

Fig.7 Normalized vertical natural period $\nu T_1/H$ and vertical damping ratio νh_1 against input acc. A_{RMS} (After 3.11 Tohoku Earthquake)

(a) $A_{RMS}=0.02\text{Gal}$

(b) $A_{RMS}=2.0\text{Gal}$

Fig.8 Correlation between building height H and period νT_1

Fig.9 Correlation between building height H and damping ratio νh_1

20~40m の範囲に、S 造建物の多くが高さ 60~100m の範囲に集まっており、回帰直線が全体傾向を捉えられていないことが考えられる。RC 系建物の回帰直線の係数は 0.004 程度であり、本報 2 章において(5)式で示した高層 RC 建物を対象とした文献 18 の係数 0.00173 と大きく異なる。また、図中に示した文献 16,17 の点も RC 系建物の回帰直線から大きく外れている。これらのことは、建物高さ と上下方向固有周期の関係が、水平方向の周期特性で一般的に言われている、(1)式のような原点を通る線形関係では表せないことを示唆している。このような建築構造物の上下方向固有周期の定性的傾向については、5 章で検討を行う。

続いて Fig.9 に、2 つの振幅レベルに対する、建物高さ H と上下方向 1 次減衰定数 νh_1 の関係を示す。図中には、参考として、上下方向 1 次減衰定数 νh_1 と建物高さ H の関係についても(3)式の関係が成立するものとし、下式の実線及び破線で示している。

$$\nu h_1 = 0.93/H \text{ (RC 系)}, \quad \nu h_1 = 0.65/H \text{ (S 造)} \quad (7)$$

2 章で述べたように(3)式は文献 9 において微小振幅レベルの水平方向 1 次減衰定数を対象として提案された式だが、同定された上下 1 次方向減衰定数は、Fig.9(a)に示す微小振幅レベルにおいて、ほぼ(7)式の線を下回る結果となった。Fig.9(a)で RC 系建物の減衰定数

は概ね 1~3% の範囲に分布し、S 造建物は概ね 1% 未満となっている。Fig.9(a)(b)を比較すると、Fig.9(b)の中振幅レベルでは、全体に減衰定数が大きくなる。特に 50m 未満の建物の減衰定数が大きくなっており、RC 系建物では減衰定数は 2~5% 程度の範囲に多く集まっている。一方で、50m を超える S 造建物については、中振幅レベルでも 0.5~2% 程度の範囲に留まっている。

これらの結果より、上下方向の地震応答解析を行う際の減衰定数の設定について、中低層 RC 造建物において水平方向の慣用値である $h=3\%$ を用いることは必ずしも否定されないが、高層 S 造建物に対して水平方向の慣用値 $h=2\%$ を用いることはやや危険側となる可能性があることが示された。ただし、本報の対象建物の高さの分布範囲は限られており、減衰定数の適切な設定については、今後より多くの実建物の分析を蓄積していく必要があると考えられる。

5. 上下方向 1 次固有周期の定性的傾向

5.1 縮約 1 自由度系に基づく周期推定式

前章において、建物高さ と上下方向周期の関係が、水平方向で一般的に言われているような、原点を通る比例関係とならないことが示唆された。そこで本章では、建築構造物の上下方向周期の定性的傾向について、縮約 1 自由度系の等価固有周期に基づいて検討する。

Fig.10 Assumption for vertical displacement distribution

多層構造物の等価な 1 自由度系への縮約は、水平方向振動については多くの提案がある。ここでは、倉本ら²⁰⁾、竹内ら²¹⁾による限界耐力計算法と同様の方法を鉛直方向振動に対して準用する。まず、 N 層の構造物の上下方向多質点系振動モデルを考える。各層の質量を m_i 、各層の鉛直変位を u_i とすると、縮約 1 自由度系の等価質量 $\bar{M}$ 及び代表変位 Δ は下式のように表せる。

$$\bar{M} = \left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i \right)^2 / \sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i^2 \quad (8)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i^2 / \sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i \quad (9)$$

ここで、1 層の鉛直重量を W_1 とすると、等価剛性 $\bar{K} = W_1/\Delta$ より上下方向の等価 1 次固有周期 ${}_vT_{eq}$ は下式となる。

$${}_vT_{eq} = 2\pi \sqrt{\bar{M}/\bar{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{1}{W_1} \sum_{i=1}^N m_i \cdot u_i} \quad (10)$$

次に、上下方向多質点系振動モデルについて下記の仮定を設ける。

- 各層質量を全層で一律とし、 $m_i = m$ で表す。
- 各層の鉛直剛性を全層で一律とし、 $k_i = k$ で表す。かつ k は柱等の各層鉛直支持部材の軸剛性の合計によるものとする。
- 1 層の全鉛直支持部材の強度に対する 1 層長期軸力の比を β とし、 β から定まる必要断面積から鉛直剛性 k を定める。

これらの仮定は、実建物において、i)については各層の床面積及び単位面積質量が各層で変化しないこと、ii)については各層の階高及び柱断面積が変化しないことに相当する。床面積や単位面積質量、階高については実情に照らしても大きく変化することは少なく、柱断面積についても、主に施工性の観点から柱断面サイズには硬直性があり、軸力に応じた断面の細かな切り替えが行われないことも多い。これらを考慮し、上記の仮定の下で、構造物の上下方向固有周期の定式化を試みることとした。

これらの仮定により、各層の質量 m と鉛直剛性 k が一律であることから、上下方向 1 次モード振動時の鉛直方向の層間変位 δ_i を、Fig.10(a)に示すような 1 層の鉛直変形 δ_1 を底辺とする線形分布とみなすことができる。さらに Fig.10(b)に示すように δ_i と u_i 及びその総和 $\sum_{i=1}^N u_i$ の関係を定積分で近似すれば下記の関係が得られる。

$$u_i = \sum_{j=1}^i \delta_j \approx \int_1^i \delta(x) dx = -\frac{\delta_1}{2N} x(x-2N) = u(x) \quad (11)$$

Table 2 List of constants C based on typical building properties

Case	Material strength		Young's modulus E (N/mm ²)	Square root of f/E $(f/E)^{0.5}$	Axial force ratio β	Constant of Eq.(14) C
	f (N/mm ²)	F				
RC-1	30	—	24,400	0.035	0.20	0.0182
RC-2	30	—	24,400	0.035	0.25	0.0203
RC-3	42	—	28,500	0.038	0.25	0.0222
S-1	—	325	205,000	0.040	0.25	0.0231
S-2	—	325	205,000	0.040	0.30	0.0253
S-3	—	440	205,000	0.046	0.30	0.0294

$$\sum_{i=1}^N u_i \approx \int_1^N u(x) dx = \frac{\delta_1}{3} N^2 \quad (12)$$

ここから、階高を L 、柱の材料強度を f 、ヤング率を E とすると、これらと全柱強度に対する 1 層軸力の比 β により、 δ_1 は下式のように得られる。

$$\delta_1 = \frac{W_1}{k} = \frac{f\beta L}{E} \quad (13)$$

さらに重力加速度を g と置けば $W_1 = Nmg$ で表すことができ、これと(10),(12),(13) 式より、縮約 1 自由度系に基づく上下方向 1 次固有周期 ${}_vT_1$ (sec)の推定式を下式のように整理できる。

$${}_vT_1 = 2\pi \sqrt{\frac{f\beta NL}{3gE}} = 2\pi \sqrt{\frac{f\beta}{3gE}} \cdot H^{0.5} = C \cdot \sqrt{H} \quad (14)$$

このように、構造物の上下方向 1 次固有周期は建物高さ H の平方根に比例し、水平方向のような建物高さに比例する関係とは異なる結果となった。また、その係数 C は、材料強度 f と 1 層の軸力比 β の平方根に比例し、軸方向部材のヤング率 E の平方根に反比例する。さらに、本形式では係数 C が各層の質量 m に依存しない量であることも特徴といえる。

5.2 周期推定式の適用範囲

RC 造及び S 造建物の代表的な物性値に対して係数 C を算定した結果を Table2 にまとめる。RC 造については、コンクリートの設計基準強度 F_c (N/mm²)を 30 または 42 とし、ヤング率は RC 規準に拠った。また 1 層軸力比 β は 0.20 及び 0.25 とし、それらの物性値を与えた 3 ケースを想定した。これらをそれぞれ RC-1~RC-3 とする。S 造については、基準強度 F (N/mm²)を 325 (490N 級鋼材) または 440 (590N 級鋼材)、1 層軸力比 β は 0.25 及び 0.30 とした 3 ケースを設定し、これらを S-1~S-3 とした。RC 造建物の 3 ケースについて算定した係数 C の値は 0.0182~0.0222 であり、S 造建物の 3 ケースでは 0.0231~0.0294 となった。RC 造建物は、強度 F_c の上昇に伴ってヤング率も増加するため、 $(f/E)^{0.5}$ の変動が小さく、係数 C の変化量もやや小さい。また、1 層軸力比の値を $\beta=0.25$ としている RC-2、RC-3、S-1 を比較すると、RC 造建物の 2 ケースよりも S-1 の方が、 $(f/E)^{0.5}$ 及び係数 C が大きく、上下方向周期もやや長くなる。1 層軸力比 β についても、RC 造建物の長期許容応力が $0.33F_c$ であるのに対して、S 造建物は $0.67F$ であり、より大きな β をとり得るため、この意味でも S 造建物は RC 造建物に比して上下方向周期が長くなる傾向があると考えられる。ただし、実建物の設計上、 β は許容応力に対して余裕を持った数字になることが多いため、ここで

Fig.11 Estimating equations for the 1st-mode vertical natural period vT_1 with typical building properties

は RC 造建物では $\beta = 0.2 \sim 0.25$ と設定した。S 造建物の β は設定が難しいが、短期荷重時の余力や座屈長さによる許容応力の低減等を考慮し、ここでは $\beta = 0.25 \sim 0.3$ としている。

Table2 の 6 ケースの係数 C を与えた(14)式の推定式と、4 章で同定した観測建物の微小振幅レベルの上下方向固有周期、また文献 15-18 の上下方向周期特性を併せてプロットしたものを Fig.11 に示す。推定式は 3 階建以上の建物を想定し、建物高さ $H = 10\text{m}$ 以上を描画範囲とした。

Fig.11(a)は RC 系建物を対象としている。黒の丸印で示した本報 4 章で同定した建物群と、灰色の丸印で示した文献 16,17 の高層建物に対し、推定式はよく整合している。灰色の実線は、(5)式で示した文献 18 の 7 つの建物群に基づく回帰直線だが、これは推定式をやや下回っている。

Fig.11(b)は S 造建物を対象とする。△印で示した本報の建物群に加え、文献 15 の 5 棟の建物とその回帰直線 ((4)式の 1 層高さを 4m とした) を灰色の◆印及び実線でそれぞれ示す。Fig.11(b)より、推定式は高さ 100m 程度まではよく対応するが、150m を超える 2 棟については周期を過小評価している。この要因として、推定式導出の際に 5.1 で設定した、柱断面面積を各層一律とする ii) の仮定が、実建物の性状と乖離していることが考えられる。S 造建物の場合、板厚による断面調整が容易であるため、特に高さ 150m 以上の S 造超高層建物では、建物高さが高くなるに従って、実建物の周期が推定式よりも長くなっていくものと考えられる。

以上のように、本章で提案した(14)式の上下方向等価 1 次固有周期 vT_1 の推定式は、想定する建物に応じた材料強度 f と 1 層軸力比 β を適切に与えたうえで、概ね建物高さ $10 \leq H(\text{m}) \leq 150$ 程度を適用範囲とすることで、良好な推定を与えるものと考えられる。

6. 上下方向振動特性と水平方向振動特性の比較

本章では、本報で算定した上下方向振動特性の回帰直線に加えて、文献 5,6 で著者らが算定した水平 2 方向振動に対する回帰直線を用い、上下方向との比較を行う。元となる回帰直線は水平・上下とも 3.11 地震前のものとした。ただし、4 章と同様に、3.11 地震後に観測を開始した建物 CHP については地震後の回帰直線を用いた。振幅のレベルは、(1),(2)式との整合を確認するため微小振幅レベルとし、具体的な振幅は、上下方向については 4 章と同様に下部観測点の加速度 RMS 値 $A_{\text{RMS}} = 0.02 \text{ Gal}$ 、水平方向については文献 5 の微小振幅レベルに相当する平均層間変形角 $r = 10^{-6}$ とした。

Fig.12 に、(a) 建物高さ H と水平方向 1 次固有周期 $hT_1(\text{sec})$ との関

係、(b) 建物高さ H と上下 1 次固有周期 $vT_1(\text{sec})$ の関係、(c) 水平方向 1 次固有周期 hT_1 と上下方向 1 次固有周期 vT_1 の関係をそれぞれ示す。Fig.12(a)には、(1)式の水平方向 1 次固有周期と建物高さの関係を実線及び破線で示す。観測結果はいずれも(1)式の推定線と概ね整合している。Fig.12(b)には、建物高さ H と上下方向 1 次固有周期 vT_1 の関係の推定線として、5 章の検討結果より導出した(14)式の係数 C を、Table 2 の RC-2、S-2 としたものを実線及び破線で示す。これらは下式で表される。

$$vT_1 = 0.0203\sqrt{H} \text{ (RC 造)}, \quad vT_1 = 0.0253\sqrt{H} \text{ (S 造)} \quad (15)$$

上式の推定線は、観測から同定した周期と概ね整合する。かつ、Fig.8 と同様に高層 RC 建物の参考値として示した文献 16,17 の 2 棟の上下方向 1 次固有周期ともよく対応している。Fig.12(c)は、各建物の水平 2 方向の 1 次固有周期 hT_1 を横軸、上下方向 1 次固有周期 vT_1 を縦軸に取ったもので、分布傾向は Fig.12(b)と類似している。(1)式と(15)式の関係から得られる、上下方向 1 次固有周期 vT_1 と水平方向 1 次固有周期 hT_1 の関係を下式に示す。

$$vT_1 = 0.166\sqrt{hT_1} \text{ (RC 系)}, \quad vT_1 = 0.179\sqrt{hT_1} \text{ (S 造)} \quad (16)$$

Fig.12(c)中には(16)式の推定線を実線及び破線で示す。(15)式と同じく、推定線は観測から得られた水平周期と上下周期の関係と概ね整合している。また、Fig.12(b),(c)の 2 種の推定線からも明らかにように、(1)式と合わせることで、(16)式の RC 系建物と S 造建物の係数の差異は、(15)式に比して小さくなる。(15),(16)式は、5 章で述べたように、1 層軸力比やコンクリート強度等のパラメータにより係数が変化するが、変化量はパラメータの平方根によるためその感度は比較的小さい。これらを考慮すると、RC 系及び S 造の各構造形式に共通して適用でき、かつ簡便な形で表現した上下方向 1 次固有周期 vT_1 と水平方向 1 次固有周期 hT_1 の関係式として、下式を用いることができる。

$$vT_1 = 0.17\sqrt{hT_1} \quad (0.2 \leq hT_1 \leq 3.0) \quad \text{(RC 系・S 造共通)} \quad (17)$$

hT_1 の範囲は、前章の(14)式の適用範囲と整合するよう設定した。これより、上下方向と水平方向の 1 次固有周期の比 $vT_1 : hT_1$ は、 $hT_1 = 0.5 \text{ sec}$ では 1:4.2 だが、 $hT_1 = 3.0 \text{ sec}$ では 1:10.2 となり、水平方向の固有周期に応じて大きく変化することがわかる。

Fig.13 に、(a) 水平方向 1 次固有周期 hT_1 と水平方向 1 次減衰定数 $h\beta_1$ 、(b) 上下方向 1 次固有周期 vT_1 と上下方向 1 次減衰定数 $v\beta_1$ 、(c) 水平方向 1 次減衰定数 $h\beta_1$ と上下方向 1 次減衰定数 $v\beta_1$ の関係を

Fig.12 Relationships of building height H , horizontal period hT_1 , and vertical period vT_1 at small amplitude level

Fig.13 Relationships of horizontal period hT_1 , damping ratio $h\eta_1$, vertical period vT_1 , and damping ratio $v\eta_1$ at small amplitude level

それぞれ示す。Fig.13(a)には、(2)式の水平方向1次固有周期と水平方向1次減衰定数の関係を実線及び破線で示す。文献5においても言及されているが、構造種別ごとの固有周期の分布範囲が狭いこともあり、水平振動の減衰定数が固有周期に反比例する(2)式の傾向はあまり見られず、推定線はRC系建物においては減衰定数を過大評価し、S造建物については過小評価する傾向がある。Fig.13(b)に示す上下方向振動の1次減衰定数は、Fig.9で示した値と同様にRC系で1~3%、S造で0~1%程度に分布している。ここで、(15)式を(7)式に代入することにより、上下方向1次固有周期 vT_1 と減衰定数 $v\eta_1$ の関係の推定線として下式が得られる。

$$\begin{aligned} v\eta_1 &= 3.85 \times 10^{-4} / vT_1^2 \quad (\text{RC系}) \\ v\eta_1 &= 4.16 \times 10^{-4} / vT_1^2 \quad (\text{S造}) \end{aligned} \quad (18)$$

Fig.13(b)中には、上式の推定線を実線及び破線で示す。水平方向に比べれば、上下方向減衰定数が上下方向固有周期に反比例する傾向を認めることができるものの、 $T = 0.1$ 秒前後では、推定線は減衰定数を過大評価している。

Fig.13(c)は、各建物の水平方向1次減衰定数を横軸、上下方向1次減衰定数を縦軸に取ったものである。Fig.13(c)中には、 $v\eta_1 = h\eta_1$ の関係を一点鎖線で示している。RC系建物は、ばらつきは大きいものの比較的多くの建物が線の付近に位置し、上下方向の減衰定数と水平方向の減衰定数が同程度となる傾向が見られた。一方で、S造建物は全ての点が線の下に位置し、上下方向の減衰定数は水平方向の減衰定数を下回った。この要因の一つとして、S造建物の減衰を発生させる外装材や間仕切壁等の二次部材が、変形レベルの小さい上下方向にはあまり減衰効果を発揮しないことが考えられるが、この検証は不十分である。また、Fig.13(b),(c)を見るとS造建物の上下方向の減衰定数は、水平方向の周期や減衰定数によらずほぼ一定

値を取っているようにも見えるが、それらを含め、構造物の上下方向減衰の発生メカニズムの解明については、今後の課題としたい。

7. まとめ

本報では、種々の構造形式からなる計18棟の建物の強震観測記録に基づいて、上下方向1次固有周期及び上下方向1次減衰定数を同定し、その特性について検討した。得られた知見を以下に示す。

- ・観測した18建物の上下方向1次固有周期については、入力加速度振幅に対する依存性は比較的小さかった。一方で、1次減衰定数については、特にRC系建物について振幅依存が見られた。
- ・観測した18建物の上下方向1次固有周期、1次減衰定数ともに、3.11地震前後で大きな変化は見られなかった。
- ・建物下部での上下方向加速度実効値(RMS値)が2.0Galのときの上下方向1次減衰定数は、RC系建物で2~5%程度、S造建物で0.5~2%程度となった。これより、上下方向の地震応答解析時の減衰定数の設定として、RC系建物に対して水平方向の慣用値である $h=3\%$ を用いることは否定されないが、S造建物に対して慣用値 $h=2\%$ を用いることはやや危険側となる可能性がある。
- ・建築物の上下方向1次固有周期は、水平方向周期特性で一般的に言われるような、建物高さに対する比例関係は無く、高さが高くなるに従って固有周期の伸びが緩やかになる傾向がある。
- ・上記の傾向について、縮約1自由度系の等価固有周期に基づいて検討し、建物高さ H の平方根に比例する、上下方向1次固有周期 vT_1 の推定式を示した。推定式の係数 C は、材料強度 f と1層の軸力比 β の平方根に比例し、柱等の鉛直支持部材のヤング率 E の平方根に反比例する。
- ・推定式は、本報での同定結果及び既往文献のデータに対して良好な対応を示した。特にS造建物では高さが高くなるにつれて前提

条件から逸脱するため、その適用範囲も併せて示した。

- ・推定式を元に、全構造形式に共通して適用でき、かつ簡便な形で表現した上下方向1次固有周期 ${}_vT_1$ と水平方向1次固有周期 ${}_hT_1$ の関係式を提案した。
- ・観測した18建物の上下方向1次減衰定数は、同じ建物の水平方向1次減衰定数に比して、RC系建物では同程度であり、S造建物では小さい傾向が見られた。

以上のように本報は、これまでほとんど示されてこなかった、構造物の上下方向1次振動特性について検討し、その特徴を示した。一方で、本報の対象建物は限られており、今後データの少ないRC造建物や中低層S造建物を対象として、継続的な分析を行っていく必要がある。特に減衰定数は、解析的評価に与える影響が大きく、また分析手法によるばらつきが大きいことから、統一的な方法によるデータベース構築は重要である。さらに、上下方向振動の耐震性への影響を考慮するため、本報で示した上部構造の振動特性に加えて、上下方向地盤ばね特性についても検討を行い、観測的事実と整合するモデル化手法を確立していくことも今後の大きな課題である。

参考文献

- 1) Kashima, T., et al.; Change in Dynamic Characteristics of Super High-rise Buildings due to the 2011 Great East Japan Earthquake, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.21, No.48, pp.493-497, 2015.6 (in Japanese)
鹿嶋俊英, ほか3名: 東北地方太平洋沖地震による超高層建物の振動特性の変動, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第48号, pp.493-497, 2015.6
- 2) Morita, K. and Kashima, T.; Estimation of Dynamic Properties of Middle-to-low Rise RC/SRC Buildings During the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.22, No.52, pp.905-908, 2016.10 (in Japanese)
森田高市, 鹿嶋俊英: 2011年東北地方太平洋沖地震における中低層RC造・SRC造建築物の振動特性の評価, 日本建築学会技術報告集, 第22巻, 第52号, pp.905-908, 2016.10
- 3) Morita, K., et al.; Long-term Condition Monitoring of a SRC Building Before and After the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.730, pp.2037-2044, 2016.12 (in Japanese)
森田高市, ほか2名: 東北地方太平洋沖地震前後のSRC造建築物の長期状態モニタリング, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第730号, pp.2037-2044, 2016.12
- 4) Kashima, T. and Kitagawa, Y.; Dynamic Characteristics of Buildings Estimated from Strong Motion Record, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 11, No.22, pp.163-166, 2005.12 (in Japanese)
鹿嶋俊英, 北川良和: 強震観測記録から推定した建物の振動特性の特徴, 日本建築学会技術報告集, 第11巻, 第22号, pp.163-166, 2005.12
- 5) Nakamura, N., et al.; Study on Horizontal First Mode Vibration Characteristics of Low and Middle Rised RC and SRC Buildings Considering Amplitude Dependency, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.721, pp.471-481, 2016.3 (in Japanese)
中村尚弘, ほか7名: 振幅依存性を考慮した中低層RC, SRC造建物の水平1次振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻, 第721号, pp.471-481, 2016.3
- 6) Nakamura, N., et al.; Study on Horizontal First and Second Vibration Characteristics of High Rised Steel RC and SRC Buildings Considering Amplitude Dependency, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.753, pp.1561-1572, 2018.11 (in Japanese)
中村尚弘, ほか6名: 振幅依存性を考慮したS造建物の水平1次, 2次振動特性, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第753号, pp.1561-1572, 2018.11
- 7) Arakawa, T., et al.; Evaluation of Vibration Characteristics Considering Higher Modes During Earthquakes for a Middle-rise Steel Building, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.717, pp.1657-1666, 2015.11 (in Japanese)
荒川利治, ほか4名: 高次モードを含めた鉄骨造中層建物の地震時における振動特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第717号, pp.1657-1666, 2015.11
- 8) BRI Strong Motion Network: <http://smo.kenken.go.jp/ja/> (Accessed: 2019-06-04)
- 9) Architectural Institute of Japan: Damping in Buildings, 2000.10
日本建築学会編: 建築物の減衰, 2000.10
- 10) Nagano, M., et al.; Vertical Response Characteristics of a Seismically Isolated 9-storey Building During Small and Large Earthquakes and Its Dynamic Soil-structure-interaction Effects, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75, No.647, pp.77-86, 2010.1 (in Japanese)
永野正行, ほか2名: 大小地震時における9階建免震建物の上下応答特性と地盤との動的相互作用効果, 日本建築学会構造系論文集, 第75巻, 第647号, pp.77-86, 2010.1
- 11) Kinoshita, T., et al.; Validation of Vertical Response Model of Seismically Isolated Structure Based on Strong Motion Observation and Simple Evaluation Method of Dynamic Soil-structure-interaction, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.80, No.709, pp.391-400, 2015.3 (in Japanese)
木下貴博, ほか3名: 強震観測に基づく免震構造の上下解析モデルの検証と動的相互作用の簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第80巻, 第709号, pp.391-400, 2015.3
- 12) Sato, D., et al.; Vertical Response Analysis Methods Based on the Observation Earthquake Records for Isolated Buildings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.77, No.682, pp.1853-1862, 2012.12 (in Japanese)
佐藤大樹, ほか2名: 多点同時地震動観測記録に基づく免震建物の上下応答解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第682号, pp.1853-1862, 2012.12
- 13) Yokota, R., et al.; Response Evaluation of Base Isolated Buildings to Earthquake Inputs in the Horizontal and Vertical Directions Part1: Evaluation Method of Varying Vertical Load and Analysis of Structural Damping, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.545-546, 2015.9
横田伶未, ほか7名: 水平・上下同時入力時における免震建物の応答評価その1 変動面圧の評価方法と構造減衰の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.545-546, 2015.9
- 14) LI Yanjie, et al.; A Study on Vertical Dynamic Properties of A Seismic Isolated Building Based on Seismic Observation, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.613-614, 2014.9
李彦劼, ほか3名: 地震観測記録に基づく免震建物の上下方向振動特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.613-614, 2014.9
- 15) Yokota, H., et al.; Damping characteristics of high-rise steel buildings, Research Bulletin of Shimizu Corporation, No. 57, pp.35-43, 1993.4
横田治彦, ほか2名: 鉄骨造高層建物の減衰性状, 清水建設研究報告 第57号, pp.35-43, 1993.4
- 16) Ikawa, N., et al.; Evaluation on Earthquake Vertical Response of High-rise RC Building, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.975-976, 2014.9
井川望, ほか3名: 超高層集合住宅における上下方向地震応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.975-976, 2014.9
- 17) Ikawa, N., et al.; Evaluation on Earthquake Vertical Response of High-rise RC Building (Part 2), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.891-892, 2015.9
井川望, ほか3名: 超高層集合住宅における上下方向地震応答(その2),

日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.891-892, 2015.9

- 18) Nagano, M., et al.: Vertical Dynamic Properties of Super High-Rise Residential Buildings During the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures-II, pp.977-978, 2014.9
永野正行, ほか 2 名 : 2011 年東北地方太平洋沖地震時の超高層 RC 造集合住宅の上下振動特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-II, pp.977-978, 2014.9
- 19) Hida, T., et al.: Evaluation of Seismic Response Characteristics of Building Based on System Identification Methods in Time and Frequency Domain - Comparison of Identification Accuracy Among ARX Model, 4SID, and CMIF, Journal of Structural Engineering. B, Vol.64B, pp.269-279, 2018.3 (in Japanese),
肥田剛典, ほか 2 名 : 時間領域および周波数領域のシステム同定法に基づく建物の地震時動特性評価～ARX モデルおよび部分空間法, CMIF 法の同定精度の比較, 構造工学論文集, 第 64B 巻, pp.269-279, 2018.3
- 20) Kuramoto, H., et al.: Conversion of Multi-Story Building into Equivalent SDOF System and Its Predictability for Earthquake Response, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.546, pp.79-85, 2001.8 (in Japanese)
倉本洋, ほか 3 名 : 多層建築物の等価 1 自由度系縮約法と地震応答予測精度, 日本建築学会構造系論文集, 第 546 号, pp.79-85, 2001.8
- 21) Takeuchi, T., et al.: Response evaluation of passively controlled multistory building with non-uniform damper distribution, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.583, pp.115-122, 2004.9 (in Japanese)
竹内徹, ほか 3 名 : ダンパーが不均等配置された多層パッシブ制振構造の応答予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 583 号, pp.115-122, 2004.9

A STUDY ON CHARACTERISTICS OF THE FIRST-MODE VERTICAL VIBRATION OF BUILDINGS BASED ON EARTHQUAKE OBSERVATION RECORDS

Takuya KINOSHITA^{*1}, *Naohiro NAKAMURA*^{*2} and *Toshihide KASHIMA*^{*3}

^{*1} Assoc. Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr.Eng.

^{*2} Prof., Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Dr.Eng.

^{*3} Research Engineer, Building Research Institute, Dr.Eng.

This paper focuses on the first-mode natural period and damping ratio in the vertical direction for the purpose of grasping the actual characteristics of the vertical vibration of buildings. The identifications of period and damping ratio based on earthquake observation records of multiple buildings are carried out. The targets of the identifications are a total of 18 buildings consisting of reinforced concrete (RC), steel and reinforced concrete (SRC), and steel (S) structures. Auto regression and exogenous (ARX) model is used to identify the first-mode vertical natural period and damping ratio. The identified values are summarized for each structural type, and its characteristics are discussed in view of the input amplitude and the height of buildings and in comparison with its natural period and damping ratio in the horizontal direction as well.

The main findings obtained here are summarized as follows:

- 1) The 1st-mode vertical natural periods of 18 buildings show relatively small dependence on the input acceleration amplitude. On the other hand, the 1st-mode vertical damping ratios are found to be dependent on the amplitude especially in RC buildings. No significant change is found in 1st-mode vertical natural periods and damping ratios of 18 buildings between before and after The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake.
- 2) When the effective value (root-mean-square value) of vertical acceleration at the lower point of the building is 2.0 Gal, the 1st-mode vertical damping ratios are about 2~5% in RC and SRC buildings and about 0.5~2% in Steel building.
- 3) The gradient of vertical natural period of a building tends to be smaller as the height increases, in contrast to the horizontal period, which is generally proportional to the height of a building.
- 4) The above tendency is examined based on the natural period of equivalent single-degree-of-freedom (SDOF) system, and the estimation equation of the 1st-mode vertical natural period which is proportional to the square root of building height is proposed. The coefficient C of the estimation equation is proportional to the square root of the material strength f and the axial force ratio β of the first story, and inversely proportional to the square root of the Young's modulus E of vertical structural members such as columns. The estimation equation shows good correspondence to the identified values in this paper and the data from the past references.
- 5) The simple equation of relation between the 1st-mode vertical natural period ${}_vT_1$ and the horizontal 1st-mode natural period ${}_hT_1$ is proposed.
- 6) The 1st-mode vertical damping ratios of 18 buildings are similar to the horizontal 1st-mode damping ratios of the same buildings in the RC and SRC building, and those tend to be small in the Steel buildings.

(2019年6月20日原稿受理, 2019年9月2日採用決定)