傾斜した基盤上に建つ免震建物の観測と解析に基づく捩れ振動特性

TORSIONAL VIBRATION CHARACTERISTICS OF A SEISMICALLY-ISOLATED BUILDING CONSTRUCTED ON AN INCLINED BEARING LAYER INFERRED FROM RECORDED MOTIONS AND RESPONSE ANALYSES

高平友博^{*1}, 飛田喜則^{*2}, 西浦 遼^{*3}, 上林宏敏^{*4},
王 欣^{*5}, 永野正行^{*6}

Tomohiro TAKAHIRA, Yoshinori TOBITA, Ryo NISHIURA,
Hirotoshi UEBAYASHI, Xin WANG and Masayuki NAGANO

In this paper, torsional vibration characteristics of a seismically-isolated building constructed on an inclined bearing layer are investigated based on strong motion records and microtremor measurements. In order to elucidate the generation mechanism of torsional vibration, the torsional response of the building was reproduced using a 3D-frame model of the building and a 2D-FEM model of the subsurface structure. It is found that several types of torsional vibrations were generated in different frequency ranges. The warping torsional vibration, which was generated at 6.7 Hz, was found to be affected by the phase difference of the input motions.

Keywords : Inclined bearing layer; Torsional vibration, Strong motion records, Microtremor measurement, Seismic response analysis, Seismically isolated building

傾斜基盤, 捩れ振動, 強震記録, 常時微動計測, 地震応答解析, 免震建物

1. はじめに

支持基盤の深さが一様でない地盤上に建つ建物では、長さの異なる杭基礎や直接基礎などを組み合わせた基礎形式が採用されることが多い。この場合、基礎位置での表層地盤の層厚の違いによる地盤増幅率の差異から、地震時には基礎部で並進振動とともに捩れ振動が励起され、水平成層地盤と異なる増幅特性が現れる¹⁾。さらに、杭位置により地盤震動や上部構造の慣性力による負担せん断力の違いが発生することから、耐震設計時にはその影響を考慮することが重要であると指摘されている²⁾。こうした背景から、傾斜した基盤上に建つ建物について基礎の耐震性能に関する研究は数多く行われているが、上部構造を含めた動的挙動に関する検討は必ずしも多くない。山田ら³⁾や成田ら⁴⁾は傾斜基盤上に建つ杭基礎建物、異種基礎の地震時応答について、3次元FEMを用いた検討を行っている。また、遠心振動台実験により、杭支持層が傾斜した地盤上に建つ杭基礎建物の地震応答を検討した事例も見られる⁵⁾。しかし、これらは実験や数値解析に基づく検討であり、傾斜した基盤を有する地盤上に建つ建物で得られた観測記録や実測に基づく検討、特に建物応答に関する詳細な検討はほとんど見られない。

筆者らは、これまで傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震構造の実建物を対象に、基礎位置と1階床の中央部、両端部で強震観測を実施し、振動特性に関する様々な検討を行ってきた。飛田ら⁶⁾は得られた強震記録をもとに、強震時には免震装置が大きな捩れ低減効果を発揮することを明らかにした。また、3次元フレームモデルと地盤の2次元FEMを用いた地震応答解析により、強震記録の再現解析を実施するとともに、傾斜基盤で場所により長さが異なる杭の応力を評価した⁷⁾。TAKAHIRA et al.⁸⁾は、強震記録のシミュレーション解析を踏まえ、当該建物が耐震建物であると仮定した場合の捩れ応答の違いに着目した検討を行った。また、当該建物では基礎位置と1階床のみで強震観測を行っていたことから、西浦ら⁹⁾は上部建物を含めた多点常時微動計測を実施し、捩れ振動を含めた上部建物の基本的な振動性状を把握した。この際、常時微動時のある卓越振動数において、建物長辺両端部で床構面の水平動が逆位相となる鉛直軸廻りの回転と床構面の鉛直動を伴う反りが逆位相となる曲げ変形が連成したワーピング捩れ振動と呼ばれる特異な捩れ振動が励起されている可能性を示した¹⁰⁾。ただし、この際には、1階平面での計測点数が十分でなかったこともあり、上記の捩れ振動の可能性に

^{*1} 清水建設(株) (元東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻修士課程)

^{*2} (株)浅沼組名古屋支店設計部 博士 (工学)

^{*3} (株)フジタ建築本部設計統括部構造設計部

^{*4} 京都大学複合原子力科学研究所 准教授・博士 (工学)

^{*5} 足利大学工学部建築コース 准教授・博士 (工学)

^{*6} 東京理科大学理工学部建築学科 教授・博士 (工学)

Shimizu Corporation (Former Grad. Stud., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science)

Structural Design Group, Asanuma Corporation, Dr.Eng.

Structural Design Group, Fujita Corporation

Assoc. Prof., Kyoto Univ., Dr.Eng.

Assoc. Prof., Ashikaga Univ., Dr. Eng.

Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

Table 1 Building profile

Location	Kanagawa Prefecture	
Use	Residential building	
Construction area	958.6m ²	
Standard floor area	692.6m ²	
Number of floors	6 floors	
Height	17.55m	
Superstructure	Reinforced concrete (Basement: seismically-isolated structure)	
	Longitudinal direction: Rigid frame structure	Transverse direction: Rigid frame structure with a shear wall
Foundational structure	Combination of a spread foundation and cast-in-place concrete piles

Fig. 1 Plan and cross-section schematics of the entire building; the area closed by the square in dashed line (Building B) is the studied building.

については推測にとどまっていた。

そこで、本論文では、当該建物での振れ振動をより詳細に把握するために、1階位置での計測点数を増やした多点常時微動計測を再度実施し、強震記録と併せてワーピング振れ振動を含む振動特性の分析を行う。さらに上記の振れ振動の生成要因を把握することを目的に、3次元フレームモデルの基礎位置に作用する入力動を変化させた地震応答解析を行い、入力動の振幅差、位相差が、振れ応答の発生に与える影響を詳細に検討する。

最初に建物の概要を示す。次に強震記録の分析を行い、強震時に上部構造で卓越する振動数ごとにその振動性状を確認する。より多点で計測した常時微動記録から、上部構造で卓越する振動数ごとに定常振動を確認し、振動性状を分析する。最後に、上部構造と免震層からなる3次元フレームモデルと傾斜基盤を有する地盤の2次元FEMを用いた地震応答解析を行い、この結果に基づき当該建物の振れ応答の発生要因を考察する。

2. 検討対象とする免震建物と地盤の概要

2.1 上部構造と強震観測の概要

対象建物は、三浦半島北部、神奈川県逗子市に位置する6階建て鉄筋コンクリート造の集合住宅である。Table 1に当該建物の概要、Fig. 1に建物平面・断面概略図を示す。構造形式は1階と基礎の間に免震装置（高減衰積層ゴム）を配置した基礎免震構造であり、長辺方向はラーメン構造、短辺方向は耐震壁付ラーメン構造である。上部構造は長辺方向中央でエキスパンションジョイントによってA棟とB棟に分割されており、本検討では強震観測を実施しているB棟を検討対象とする。

Fig. 1に強震観測点を併記する。観測点は、免震層下部の基礎底版上面（以降、PITと称す）、及び免震層直上の1階床スラブ下面（以降、1Fと称す）にそれぞれ西端部、中央部、東端部の計6点である。観測方向は、中央部では短辺方向（以降、NSと称す）、長辺方向（EW）及び上下方向（UD）であり、両端部ではNSの1方向のみである。いずれも建物短辺方向の南側に設置されている。サン

リング周波数は100 Hzである。

2.2 地盤構造の概要

対象建物直下の地盤構造は、主に $V_s=730$ m/s の土丹層である支持基盤と、 $V_s=140$ m/s のシルト主体の沖積層である表層地盤の2層地盤となっている。ボーリングデータから推定した基盤深度分布をFig. 1に示す。支持基盤は敷地内で東西に傾斜しており、約23.5 mの高低差を有する。また、基盤傾斜方向は建物に対して約60度回転している。基礎構造は、支持基盤深さが最も浅い西端部のみ直接基礎、それ以外の地点では支持基盤深さに応じた長さの異なる場所打ちコンクリート杭である。東端部付近での基盤深度はGL-26 mであり、常時微動計測によるH/Vスペクトルから求められた地盤東端部の卓越周期は約0.74 s⁶⁾である。

3. 強震記録の分析に基づく振れ振動性状

最初に、対象建物において2000年4月から2017年8月までに得られた強震記録から比較的小振幅である記録を選択し、振れ振動を検討する。

3.1 小振幅の強震記録の振動特性

小振幅の強震記録として選択した地震は、最も基盤に近いPIT西端部におけるNS方向の最大加速度が10 cm/s²以下、かつ高振動数成分を多く含む震央距離が100 km以下となる45地震である。Fig. 2に選択した地震の震央位置と気象庁マグニチュードを示す。

Fig. 3に45地震の強震記録で得られた1FとPITにおけるNS方向のフーリエ振幅スペクトルの平均値を示す。フーリエ振幅スペクトルの平均値は、継続時間を揃えた各時刻歴加速度記録をFFT変換し、振動数ごとの二乗平均の平方根とした。1Fは1.2 Hz、6.8 Hz付近で卓越している。1.2 Hzでは基盤が深くなる東端部にかけてやや増大するがほぼ同振幅であり、6.8 Hzでは中央部の振幅が小さく両端部が大きくなっている。これらは後に示す常時微動計測でも確認されている。PITでは1~3 Hz付近で振幅が大きく、東端部にかけて増大し、かつ卓越振動数が低くなっている。上部構造で見られた6.8 Hz付近の大きな卓越は見られない。

Fig. 2 Epicenter locations and magnitude (M_j) of the small-amplitude earthquakes

(a) 1F

(b) PIT

Fig. 3 Average fourier amplitude spectra of using small-amplitude earthquakes records in the NS direction at (a) 1F and (b) PIT

Table 2 Outline of two earthquakes used in this study

	Epicenter	Date Time	M_j	Epicentral Distance	Maximum acce. (cm/s^2) (Center NS)		Max. shear deformation of the Isolator (Center)
					PIT	1F	
No. 1	Northwestern Chiba	2003/05/12 00:57:58	5.3	78 km	5.03	5.88	0.60%
No. 2	Northeastern Chiba	2016/07/19/ 12:58:14	5.2	70 km	7.88	4.23	0.76%

(a) Earthquake No.1

(b) Earthquake No.2

Fig. 4 Acceleration waveforms in the NS direction at PIT

(a) Earthquake No.1

(b) Earthquake No.2

Fig. 5 Running spectra and acceleration waveforms in the NS direction at west end of 1F

(a) 1.2 Hz

(b) 6.8 Hz

Fig. 6 Planar steady-state response of the 1F and PIT during the Earthquake No.1

本検討では 2003 年 5 月 12 日に千葉県北西部で発生した地震 (M_j 5.3), 2016 年 7 月 19 日に千葉県北東部で発生した地震 (M_j 5.2) を対象に, 振れ振動を詳細に分析する。(以降, それぞれを地震 No.1, 地震 No.2 と称す。)これらの地震の概要を Table 2 に, PIT における NS 方向加速度波形を Fig. 4 に示す。Fig. 5 に地震 No.1 と地震 No.2 の 1F における NS 方向ランニングスペクトルと加速度波形を西端部について示す。ランニングスペクトルは, 一区間 10 s (1000 step)ごとにハニングウィンドウ処理を行った後 FFT を行い, これを 1 s ずつずらすことで算出した。Fig. 3 に見られた 1.2 Hz の卓越振動数は両地震で共通に見られるが, 地震 No.2 では 6.8 Hz のピークがやや小さくなっている点が異なる。また地震 No.1 では, 1F では 1.2 Hz 付近と 6.8 Hz 付近の振幅がそれぞれ最大となる時刻が概ね一致する。地震 No.2 では, 約 20 秒から 6.8 Hz 付近の振幅が大きくなり, 同時時間帯の 1.2 Hz 付近でも卓越が生じている。両地震ともそれ以降の時間帯では 1.2 Hz 付近を主とした振動となり, 6.8 Hz 付近の振動は継続時間が短い傾向にある。

3.2 卓越振動数における振れ振動特性

強震記録に対し, 各卓越振動数を中心としたバンドパス処理を行い, そのときの建物の定常応答を確認する。バンド幅は 0.2 Hz とする。以降に示す検討における全てのバンドパス処理についても同様のバンド幅とする。

地震 No.1 の主要動部について, 1.2 Hz と 6.8 Hz における NS 方向の 1 周期の応答を 8 分割して図示した結果を Fig. 6 に示す。1.2 Hz では 1F で NS 方向の並進振動が見られる。PIT と 1F の両方で基盤深さの増大に従って, 西端部から東端部にかけて振幅が大きくなり, 並進振動に伴う振れ振動が生じている。6.8 Hz では 1F で中央部を中心とした振れ振動が生じている。ただし, 建物上層階には強震観測点が存在せず上部構造全体の振動性状を直接評価することはできないため, 後で示す常時微動計測の結果と併せて検討する。

3.3 最大振幅付近の西端部に対する東端部の位相差

地震 No.1 では並進及び振れ振動の最大となる時刻が概ね一致していたことから, 最大振幅付近の入力地震動について検討を行う。Fig. 7 に地震 No.1 の NS 方向について, 1.2 Hz を中心としたバンドパス加速度波形を示す。PIT では西端部から東端部にかけて振幅が増大するが, 位相差は小さい。1F についても同様である。

Fig. 8 に 6.8 Hz を中心とした 1F の NS 方向バンドパス加速度波形を地震 No.1 と No.2 の両方について示す。西端部に対する東端部の位相差を 1 周期ごとに評価した結果を同図に○●で併記する。地震 No.1 では PIT の位相差が最大で 90° 程度であり, 1F も両端部

Fig. 7 Bandpass-filtered (around 1.2Hz) acceleration waveforms in the NS direction of the Earthquake No.1

Fig. 8 Bandpass-filtered (around 6.8Hz) acceleration waveforms in the NS direction at 1F and phase difference at PIT and 1F of two earthquakes

が完全な逆位相ではない。これに対し地震 No.2 では PIT と 1F の両端部が完全な逆位相に近い振動を示している。

4. 常時微動計測に基づく振れ振動性状

強震記録は PIT, 1F のみであったが、多点常時微動計測を行い、PIT, 1F の短辺方向両端部、地盤、6 階 (6F) を含む振動性状を詳細に分析する。

4.1 常時微動計測の概要

微動計はアカシ社製ポータブル加速度計データ収録装置 GPL-6A3P を最大 12 台 (3 成分/台) と東京測振製速度計 SPC-52 を最大 9 台 (1 成分/台) 用いた。計測は、サンプリング周波数を 200 Hz とし GPL では 20 Hz のハイカットフィルターを設定した。1 回の計測時間は約 40~50 分であり、上部構造の振動性状を詳細に調べるため、計測器の位置を変え合計 3 回の計測を実施した。Table 3 に計測概要と目的、Fig. 9 に計測器設置位置を示す。計測 No.1 は上部構造の短辺方向のロッキング振動、計測 No.2 は 1F の詳細な平面振動性状、計測 No.3 は 1F, PIT, 地盤面の振動性状の把握を目的とした。

4.2 上部構造と PIT の卓越振動数

Fig. 10 に計測 No.1 における NS 方向と UD 方向のフーリエ振幅スペクトルを示す。フーリエ振幅スペクトルは、交通振動や生活振動等のノイズの少ない時間帯から 40.96 秒 (8192 step) の常時微動部分を 20 区間抜き出し、その平均値とした。Fig. 10(a) より、上部

構造の NS 方向の卓越振動数は、1.3 Hz, 2.2 Hz, 4.0 Hz, 6.0 Hz, 6.7 Hz である。このうち 1.3 Hz と 6.0 Hz の振動は、西端部、中央部、東端部の全点で卓越している。1.3 Hz では層厚の深い建物東端部の振幅がやや大きくなっていることから、振れを伴った並進振動であり、前述した強震記録の傾向と整合する。一方、2.2 Hz と 6.7 Hz の振動は、中央部を除いた両端部で大きく卓越していることから、振れ振動と考えられる。また、Fig. 10(b) に示す上部構造の UD 方向でも中央部を除いた両端部で 6.7 Hz 付近の卓越が確認できる。これらの卓越振動数は過去の計測 ⑨においても確認されている。なお、Fig. 10(a) には 4.0 Hz 付近に卓越振動数が見られるが、過去の計測 ⑨で A 棟の東端部 NS 方向では 1.3 Hz, 2.2 Hz, 6.7 Hz に加えて 4.0 Hz に卓越が見られたことから、A 棟の影響と推察される。

Fig. 10(c) より、PIT の NS 方向では 6 Hz 付近までは表層地盤が厚くなる東端部にかけて振幅が増大しているが、それ以降の高振動数域では表層地盤の浅い西端部の振幅が増大する傾向にある。また、Fig. 10(d) より、PIT の UD 方向では 6.7 Hz 付近において西端部で卓越しており、上部構造の卓越振動数と一致する。Fig. 11 に計測 No.3 における西端部の 1F, PIT, 地盤面の UD 方向におけるフーリエ振幅スペクトルを示す。1F と PIT では計測 No.1 と同様に 6.7 Hz 付近で振幅の増大が見られるが、地盤面では増大しておらず、PIT 西端部における 6.7 Hz の卓越は上部構造の振動によって励起されているものと考えられる。EW 方向については、過去の計測 ⑨により 1F で 1.3 Hz と 1.9 Hz に卓越振動数が見られ、それより高振動数ではピークが見られなかった。両振動数ともほぼ同位相、同振幅で振動することを確認しており、以降では振れ振動を含む複雑な振動特性を呈する NS, UD 方向について検討する。

4.3 各卓越振動数における振れ振動性状

卓越振動数 1.3 Hz, 2.2 Hz, 6.0 Hz について、PIT, 1F 及び 6F における 1 周期の NS 方向の定常振動を Fig. 12 に示す。1.3 Hz では、上部構造各階において西端部、中央部、東端部の 3 点でわずかに振幅差が生じている。さらに、西端部、中央部、東端部それぞれにおいて 1F と 6F の振幅差はほとんど見られないことから、上部構造がほぼ剛体として、振れを伴った NS 方向並進振動を呈することがわかる。2.2 Hz では、上部構造の各階で中央部の振幅が小さく、両端部の振幅が大きくなっており、建物中央部を中心とした振れ振動が生じている。さらに、西端部、中央部、東端部の振幅分布が直線からわずかにずれており、剛床とはやや異なる振動を呈する。また、1.3 Hz の NS 方向並進振動と同様に西端部、中央部、東端部のそれぞれで 1F と 6F の振幅差がほとんど見られず、高さ方向について一様に振動している。6.0 Hz では、両端部と中央部が逆位相となる弓なりの定常振動であり、剛床は成り立っていないが、高さ方向については概ね一様に振動している。

卓越振動数 1.3 Hz と 2.2 Hz における PIT の NS 方向加速度波形を建物北側と南側について Fig. 13 に示す。1.3 Hz では、西端部から東端部にかけて振幅が増大しており、わずかにずれがあるもののほぼ同位相で振動している。また、建物北側と南側がほぼ同位相、同振幅で振動しており、入力において短辺方向の振れは生じていないことがわかる。これより、Fig. 10(a) で見られた上部構造 NS 方向の 1.3 Hz 付近における振れを伴った並進振動は入力の振幅差による影響が大きいと考えられる。2.2 Hz では、1.3 Hz と同様に建物東

Table 3 Outline and objectives of microtremor measurement

		Measurement Location (○: GPL-6A3P △: SPC-52)					Date/ Onset time	JMA(Tsujido)		Purpose of measurement
		West end	West central	Center	East central	East end		Wind direction	Avg. wind velocity	
No.1	6F	○		○		○	2019/12/21 12:35	South- southeast	4 m/s	Rocking of the superstructure in the NS direction
	1F (Floor)	○		○		○				
	Beneath 1F	△		△		△				
	PIT	○		○		○				
No.2	Beneath 1F	△	△	△	△	△	2019/12/21 14:25	North- northeast	3 m/s	Planar vibration characteristics at 1F
	PIT	○		○		○				
No.3	1F (Floor)	○					2017/10/31 14:45	South- southeast	3 m/s	Vibration characteristics of 1F, PIT and the ground surface
	PIT	○								
	Ground	○

Fig. 9 Locations of microtremor measurement

Fig. 10 Fourier amplitude spectra obtained from measurement No. 1

Fig. 11 Fourier amplitude spectra in the UD direction at west end obtained from measurement No. 3

端部にかけて振幅が増大しており、その傾向が顕著である。さらに、西端部から東端部にかけて位相差が生じており、振幅差と位相差の両方を伴う振れ入力になっている。

4.4 ワーピング振れ振動

計測 No.1 の 1F と PIT における NS 方向の加速度波形について、6.7 Hz を中心としたバンドパスフィルターを掛けた結果を Fig. 14 に示す。西端部に対する東端部の位相差を 1 周期ごとに評価した結果を同図に併せて示す。1F の中央部を節として両端部と中央部が概ね逆位相となる振動が前半約 2 秒で生じており、それ以降は中央部の振幅が増大し、両端部の位相差が 90° 程度まで変化する。これに対し PIT でも前半は両端部が逆位相で振動しているが、後半にかけて 90° 程度まで変化する。

6.7 Hz における平面的な挙動をより詳細に確認するため、計測 No.2 の 1F における NS 方向の加速度波形について、1/8 周期ごと

の定常振動を Fig. 15 に示す。1F がほぼ剛床のような平面的な振れ振動をしており、前述したように 2.2 Hz の振動が剛床とはやや異なる振動であったことと比べると、振れ振動の性状が異なっている。Fig. 14 における前半約 2 秒間の挙動に着目し、計測 No.1 から得られた 1/8 周期ごとの NS, UD 方向の記録により作図した立体定常振動を Fig. 16 に示す。それぞれの左図にアイソメ、右図に東端部から見た立面を示す。この振動数では、中央部が振動しておらず、両端部構面がほぼ逆位相にロッキング振動をしていることがわかる。小室、井口 〇は埋土・切土地盤上に建つ細長い建物を対象に常時微動計測を行い、ワーピング振れ振動と呼ばれる特異な振れ振動が励起されていることを示した。これは Fig. 17 に示す概要図のように、建物長辺両端部において床構面の水平動が逆位相となる鉛直軸廻りの回転と、床構面の鉛直動を伴う反りが逆位相となる曲げ変形が連成した変形モードである。対象建物における 6.7 Hz の振動はワー

Fig. 12 Planar steady-state vibration in the NS direction at different frequencies obtained from measurement No.1

Fig. 13 Bandpass-filtered acceleration waveforms in the NS direction at PIT obtained from measurement No.1

Fig. 14 Bandpass-filtered (around 6.7Hz) acceleration waveforms and phase difference in the NS direction at PIT obtained from measurement No.1

Fig. 15 Planar steady-state vibration at 6.7 Hz in the NS direction at 1F obtained from measurement No.2

Fig. 16 3-D steady-state vibration at 6.7 Hz in the NS and the UD directions obtained from measurement No.1

Fig. 17 Schematic diagram of warping torsional vibration⁽¹⁾

ピング振れ振動であると推定できる。Fig. 14 の後半では 1F で中央部の振幅が増大し、両端部の位相差が 90° 程度まで変化するものの、上記と類似した振れ挙動が確認された。また、1F の NS 方向の振動が Fig. 6(b) の地震 No.1 における 6.8Hz の振れ振動と調和的であることから、強震時にも並進に加えワーピング振れ振動が生じている可能性がある。

当該敷地において、地震時では下方から入射する S 波が表層地盤

厚さの変化により、常時微動時では水平方向へ伝播する表面波により、それぞれ Fig. 8、Fig. 14 に示すように、建物の東端と西端での位相の時間遅れが発生する傾向が共通して見られる。常時微動時には両端の位相差が $90^\circ \sim 180^\circ$ で変化しているものの、先にも述べたようにいずれの場合でも上部建物ではワーピング振れ振動もしくはそれに類似した振動が確認され、これらは建物長辺方向に沿った位相差入力動に起因したものであると考えられる。このように、波動

場としては地震時と常時微動時には異なるものの、位相差入力動を与えるという事象としては共通しているため、次章の解析検討では基礎層におけるS波鉛直入射時に表層地盤の厚さが異なること等によって生じる地表面での位相遅れを表現した入射波動場を仮定して、振れ振動を検討する。

5. 解析モデルを用いた振れ応答の分析

建物の3次元フレームモデルと地盤の2次元FEMモデルを用いて地震応答解析を行い、基礎位置での入力動の振幅差、位相差が上部構造の振れ応答に与える影響を検討する。特に、強震時と常時微動時の両方で見られた1.3 Hz付近の振れを伴った並進振動と、強震時に発生が示唆され常時微動時にワーピング振れ振動を示した6.7 Hz付近の振動に注目した。

5.1 建物モデルの概要

建物の地震応答解析には、免震層下部を固定とした免震装置-上部構造からなる3次元フレームモデルを用いる¹²⁾。Fig. 18にモデルの俯瞰図を示す。上部構造は、柱・梁を曲げ、せん断、軸剛性を考慮した線材、床部材を平面板要素、耐震壁を壁エレメント置換モデルで表現する。上部構造は弾性とし、各層を非剛床とする。免震装置の水平方向の復元力特性は、12本のバネからなるMSSモデルで評価し、既往の研究⁷⁾⁸⁾¹³⁾をもとに高減衰積層ゴムの微小変形時の剛性を考慮した標準トリリニア型とする。鉛直性能は単軸バネモデルで評価し、設計時の剛性を用いる。並進方向での杭、地盤との動的相互作用は小さいものと仮定し、PITで地震動を多点入力し、上部構造の振れ応答を検討する。

5.2 建物モデルの固有値解析による振れ振動

Table 4に本検討における固有値解析から得られた免震装置初期剛性時の固有振動数を示す。これより、NS方向の並進1次固有振動数は1.29 Hzであり、常時微動時のNS方向並進振動数に対応する。振れの固有振動数は1.33 Hzとなっている。常時微動時に見られた2.2 Hzとは差があるが、これはA棟の影響であるものと推察される⁹⁾。ワーピング振れ振動に対応すると推定される振動数は6.43 Hzである。Fig. 19にNS方向並進1次固有モード図を、Fig. 20, 21に振れ振動に対応する固有モード図を示す。Fig. 21ではワーピング振れ振動に対応するモードが確認でき、上部構造が一体となるFig. 20の振れ1次モードとは異なるモード形状となっている。既報¹⁰⁾で、杭基礎-免震装置-上部構造を各種線材に置換し、各層を非剛床とした3次元フレームモデルによる固有値解析を行った結果、ワーピング振れ振動に対応する固有モードを確認することができた。本検討では杭基礎を含まないモデルでワーピング振れ振動を確認できたことから、この振動モードは上部構造固有のものであると推察される。

5.3 地盤モデルの概要

対象建物直下の地盤は、反時計回りに60度回転させると2次元の2層傾斜地盤とみなすことができる。この地盤を2次元FEMでモデル化し、面外(SH)波と面内(SV)波の鉛直入射時の2次元地盤応答を周波数応答解析で評価する。S波速度140 m/sに対して有効振動数が10 Hzとなるようにメッシュ間隔を設定する。このモデルにより中央部と東西端部の強震記録の関係が良好に再現されており¹⁴⁾、建物モデルの各基礎位置の地震動を算出することが可能となった。解析モデル、検討の詳細は文献⁷⁾¹⁴⁾を参照のこと。

Fig. 18 Axonometric diagram of the building model

Table 4 Natural frequencies obtained from eigenvalue analysis

EW	NS	Torsional	Warping torsional
1.21Hz	1.29Hz	1.33Hz	6.43Hz

Fig. 19 Fundamental mode in NS direction

Fig. 20 Fundamental torsional mode

(a) Plan view (b) Axonometric view
Fig. 21 Warping torsional mode in eigenvalue analysis

Fig. 22 Evaluation process for input motions at building basement using 2D-FEM

5.4 定常波を用いた地震応答解析の概要

常時微動計測と強震観測によって確認された上部構造の応答性状と基盤傾斜の関連性を把握するために、基盤波に定常波を用いた地震応答解析を行う。Fig. 22 に解析の概略を示す。まず、基盤波として NS 方向のみに振幅を有する定常波を定義し、これを SH 波、SV 波に分離する。次に 2 次元 FEM の面内、面外の伝達関数を用いて地表面の地盤応答を算出する。これらを NS 方向に変換したものを各杭頭位置への入力地震動とし、建物モデル全杭頭位置に多点入力し、上部構造の振れ応答を検討する。

また、算出した地表面の応答のうち西端部を基準とし、全杭頭位置における振幅差と位相差を抽出し、これをパラメータとする。振幅差と位相差を変化させた入力地震動を建物モデル全杭頭位置に多点入力し、これらが上部構造の振れ応答に与える影響を分析する。

5.5 地盤応答の振幅差、位相差の分析

定常波の振幅は、基盤で NS 方向のみに振幅を有し、かつ地表西端部の NS 方向における最大応答振幅が 1 cm/s^2 となるよう調整する。Fig. 23 に設定した基盤波の加速度波形を SH、SV 波について示す。強震時と常時微動時の両方で見られた振れ振動について検討するため、1.3 Hz 付近と 6.7 Hz 付近を対象として定常波の振動数を設定する。Fig. 23 は定常波の振動数を 1.3 Hz とした場合について示している。時間刻みは 0.001 s とする。Fig. 24(a) に基盤波の振動数を 1.3 Hz とした場合について、地表西端部、中央部、東端部の NS 方向応答加速度波形を示す。西端部から東端部にかけて振幅が増大するが、位相差は小さく、強震時の 1.2 Hz と常時微動時の 1.3 Hz における PIT と同様の傾向である。Fig. 24(b) に基盤波の振動数を 6.7 Hz とした場合について、地表西端部、中央部、東端部の NS 方向応答加速度波形を示す。6.7 Hz では、両端部の振幅が中央部よりも大きい。さらに、両端部が逆位相で振動しており、Fig. 8 で見られた強震時における 1F の中央部を節とした振れ振動が励起されやすい地震 No.2 の PIT の位相差と、Fig. 14 で見られた常時微動時におけるワーピング振れ振動が励起されやすい時間帯の PIT の位相差と、傾向が一致する。

5.6 入力の振幅差、位相差が上部構造の振れ応答に与える影響

入力が振幅差、位相差の両方を伴う 6.7 Hz 付近について、2 次元地盤 FEM で算出した地盤応答を 3 次元フレームモデルに多点入力し、上部構造の振れ応答を分析する。3 次元フレームモデルの上部構造の減衰は剛性比例型とし、1 階床固定時の NS 方向 1 次固有周期に対し $\eta=0.03$ とする。免震装置の内部粘性減衰は、免震層初期剛性時の 1 次固有周期に対し $\eta=0.01$ とする。ここでは基盤波としての定常波の振動数を 3 次元フレームモデルのワーピング振れモードに対応する 6.43 Hz とし、このモードに特化した検討を行う。なお、6.43 Hz における地盤応答について、前節で示した 6.7 Hz における地盤応答と振幅差、位相差の両面で傾向が変わらないことを確認している。地震波の入力方向は単純化のため NS 方向のみとし、平面的な振れについて検討する。Fig. 25 に地震応答解析から得られる NS 方向の最大振幅分布を示す。西端部から中央部にかけて振幅が低減し、そこから東端部にかけて増幅する。同様に位相差についても Fig. 26(a) に示す。西端部と東端部はほぼ逆位相で振動しており、その間は概ね均等に位相ずれが生じている。Fig. 27 に 6.43 Hz における地盤応答を 3 次元フレームモデルに入力したときの加速度分

Fig. 23 Acceleration waveforms of bedrock waves

(a) 1.3 Hz

(b) 6.7 Hz

Fig. 24 Acceleration response waveforms in the NS direction at ground surface calculated by 2D-FEM

布図を 1F と屋上階 (RF) について示す。加速度分布図は 1F 東端部の加速度の絶対値が最大となる時刻について示している。そのときの 1F 両端部の加速度を併記する。各階両端部及び端部ごとの 1F と RF が概ね同振幅かつ逆位相で振動しており、ワーピング振れ振動が生じていることがわかる。

入力の振幅差と位相差がワーピング振れ振動に与える影響について検討する。Fig. 25 に設定した振幅差を併せて示す。振幅差は、2 次元 FEM の地盤応答から得られた各点の定常区間における最大振幅を適用したものと、全点で最大振幅を 1 cm/s^2 に統一したものの 2 種類を設定した。Fig. 26 に設定した位相差を併せて示す。位相差については、2 次元 FEM による西端部の地盤応答を用いて各点について均等に位相をずらし西端部と東端部が概ね 90° になるようにしたケース、同様にして西端部と東端部の位相差が概ね同位相になるようにしたケース、全点が同位相になるようにしたケースの 3 種類を設けた。これらの組み合わせのうち、振れ応答の変化が明瞭となる、Table 5 に示す 4 つの解析ケースを設定した。Fig. 28 に各解析ケースにおける加速度分布図を 1F と RF について示し、そのときの 1F 両端部の加速度を併記する。ここでは、1F の最大加速度がより大きい端部において加速度の絶対値が最大となる時刻について示している。Fig. 29 に 1F と RF の西端部に対する東端部の最大相対加速度と位相差を示す。

まず振幅差が共通で位相差が異なる case1, case2, case3 の結果を比較する。地盤両端部の位相差を 90° に設定した case1 では、Fig. 28(a) より中央部を節として各階に振れが生じており、そのときの加速度には両端部で差があるものの、ワーピング振れ振動と調和的な振動である。しかし、Fig. 29 より 2 次元 FEM の地盤応答を入力した場合と比べて両端部の位相差がやや小さくなっており、PIT の位相差が両端逆位相からずれると上部構造の両端の位相差も逆位相からずれるという強震時の Fig. 8 及び常時微動時の Fig. 14 の傾向と一致する。入力の両端部が同位相である case2 と case3 について Fig. 28(b), (c) を見ると、やや弓なりを伴う短辺方向並進 2 次モードのような振動を示しており、ワーピング振れ振動は生じていない。

3次元フレームモデルの固有値解析では6.74 Hzでやや弓なりを伴う短辺方向並進2次モードが現れ、case2とcase3ではこのモードが励起されていると考えられる。また、Fig. 29より、case2とcase3は2次元FEMの地盤応答を入力とした場合やcase1に比べて、西端部に対する東端部の位相差や最大相対加速度が小さい。位相差はあるが両端が同位相となるcase2で生じていないことも踏まえると、ワーピング振れ振動は入力動の位相差に大きな影響を受け、両端が逆位相となる場合に最も励起されやすいと考えられる。

次に、位相差を設けず、振幅が異なるcase3とcase4を比較すると、Fig. 28(c), (d)よりどちらも前述の弓なりを伴う短辺方向並進2次モードのような振動を示しており、ワーピング振れ振動が生じていない。これより、振幅差だけではワーピング振れ振動の成因にならないことが分かる。ここには示していないが、振幅差がなく位相差のみを考慮した場合の結果は、case1,2とほぼ同じ傾向を示す。なお、本検討では水平入力時の応答に着目したが、鉛直方向の入力の影響については今後の検討としたい。

6. まとめ

本研究では、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物について、

基礎位置と1階床で実施している強震観測とより多点に配置して実施した常時微動計測により、ワーピング振れ振動を含む振動特性を分析した。さらに、3次元フレームモデルと2次元FEM地盤モデルを用いた地震応答解析により、記録で見られた傾向の再現と、入力動の振幅差、位相差をパラメータとして建物の振れ応答性を調べた。以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- 1) 強震記録の分析により、小振幅地震時には上部構造で1.2 Hzと6.8 Hzの卓越が見られた。これら2つの振動数における平面定常振動は常時微動時のものと調和的であり、強震時にも並進に加えワーピング振れ振動が生じている可能性がある。
- 2) 小振幅地震時における6.8 Hzを中心としたバンドパス加速度波形より、PIT両端部の位相差が逆位相に近づくほど1F両端部の位相差も逆位相に近づく傾向が一部で見られ、常時微動時の6.7 Hzで見られた傾向と調和的であった。
- 3) 常時微動計測により、上部構造では1.3 Hzで短辺方向並進振動、2.2 Hzで建物中央を中心とした振れ振動、6.0 Hzで建物両端部と中央部が逆位相となる弓なりの振動、6.7 Hzで建物長辺両端部において床構面の水平動が逆位相となる鉛直軸廻りの回転と、床構面の鉛直動を伴う反りが逆位相となる曲げ変形が連成した

Fig. 25 Maximum acceleration on ground surface (6.43 Hz)

Fig. 26 Phase differences of motions on ground surface (6.43 Hz)

Fig. 27 Planar distribution of floor acceleration (2D-FEM)

	case1	case2	case3	case4
Amplitude	2D-FEM	2D-FEM	2D-FEM	Constant
Phase difference	90 degrees between both ends	360 degrees between both ends	No phase difference at all points	No phase difference at all points
Correspondence with Fig. 26	(b)	(c)	(d)	(d)

Fig. 28 Planar distribution of floor acceleration for each analysis cases

Fig. 29 Maximum relative acceleration and phase difference between west and east ends

振動であるワーピング振れ振動が確認された。

- 4) 常時微動時の PIT では、1.3 Hz では表層地盤が厚くなると共に振幅が増大した。2.2 Hz ではこれに加えて位相差が生じていた。6.7 Hz では両端部が逆位相となる時間帯が見られ、より高振動数域になるほど建物に対する入力振れの振れが複雑化する傾向にあった。
- 5) 上部構造と免震層からなる 3 次元フレームモデルを用いた固有値解析により、常時微動時と近い振動数で短辺方向並進モードとワーピング振れモードを確認した。
- 6) 2 次元 FEM 地盤モデルを用い、基盤波として定常波を用いた地震応答解析を行った結果、強震時、常時微動時の 1F で確認された振動数における地盤応答の位相差は、強震時、常時微動時の PIT と調和的であった。
- 7) 強震時と常時微動時の両方で卓越が見られ、上部構造、PIT ともに複雑な振動性状が見られた 6.7 Hz 付近について、3 次元フレームモデルと 2 次元 FEM 地盤モデルを用いた地震応答解析により、入力の振幅差と位相差が上部構造の応答に与える影響を検討した。ワーピング振れ振動を誘発する成因としては、入力の振幅差の影響は小さく、両端部の位相差による影響が大きいことがわかった。

謝辞

本研究では、対象建物の住民の方々のご理解のもとで微動計測を実施することができました。微動計測には浅沼組・山内豊英博士、東京理科大学理工学部建築学科永野研究室の学生にご協力いただきました。ワーピング振れ振動については、東京理科大学名誉教授・井口道雄先生よりご助言を頂きました。また、一部図の作成には GMT¹⁰⁾ を利用させて頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) WATANABE, T., IIBA, M., KATO, K. and KOSHIKA, N.: A Fundamental Study of Effects of Inclined Engineering Bedrock on Amplification Characteristics in Surface Layer, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.17, No.36, pp.455-459, 2011.6 (in Japanese)
渡辺哲史, 飯場正紀, 加藤研一, 小鹿紀英: 工学的基盤の傾斜が表層地盤の増幅特性に与える影響に関する基本的検討, 日本建築学会技術報告集, 第 17 巻, 第 36 号, pp.455-459, 2011.6
- 2) Architectural Institute of Japan Recommendation for design of building foundations, pp.329-348, 2001 (in Japanese)
日本建築学会: 基礎構造設計指針 2001, pp.329-348, 2001
- 3) YAMADA, A., MIURA, K.: Nonlinear Earthquake Response of Structure on Composite Foundation, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.529, pp.113-119, 2000.3 (in Japanese)
山田有孝, 三浦賢治: 異種の基礎を併用した構造物の弾塑性地震応答性状, 日本建築学会構造系論文集 第 529 号, pp.113-119, 2000.3
- 4) NARITA, N., YASUI, M., KANEKO O.: The Effects of Torsional Response at Composite Foundation with Piles and Footings that Affect Seismic Inertial Force of a Building, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.83, No.743, pp.101-109, 2018.1 (in Japanese)
成田修英, 保井美敏, 金子治: 杭基礎と直接基礎を併用した異種基礎のねじれ応答が建物の地震時慣性力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集 第 83 巻 第 743 号, pp.101-109, 2018.1
- 5) KOJIMA, H., SHOJI, M., FUJIMORI T.: Centrifuge Model Test of Pile-foundation Structure Supported by Sloping Bedrock -Part 1- Outline of Test Loaded to Sloping Direction and Pile Stress, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure- I, pp.385-386, 2017.7 (in Japanese)
小島宏章, 勝二郎智, 藤森健史: 傾斜地盤に建つ杭基礎建物の遠心振動台実験 (その 1) 傾斜方向加振実験の概要および杭応力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.385-386, 2017.7
- 6) TOBITA, Y., NAGANO, M., KITAMURA, H., SATO, T., SUZUKI, K., MATSUDA, Y. and YAMAUCHI, T.: Study on Torsional Response of Seismically Isolated Building on Soil with Inclined Bedrock using Strong Motion Records, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.23, No.54, pp.409-414, 2017.6 (in Japanese)
飛田喜則, 永野正行, 北村春幸, 佐藤利昭, 鈴木賢人, 松田頼征, 山内豊英: 強震記録に基づく傾斜基盤上に建つ免震建物の振れ応答の分析, 日本建築学会技術報告集 第 23 巻 第 54 号, pp.409-414, 2017.6
- 7) TOBITA, Y., NAGANO, M., KITAMURA H., YAMAUCHI, T.: Seismic Response Analysis of Seismically Isolated Building Constructed on Soil with Inclined Bedrock Based on Strong Motion Records and Evaluation of Pile Stresses, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.84, No.756, pp.149-159, 2019.2 (in Japanese)
飛田喜則, 永野正行, 北村春幸, 山内豊英: 強震記録に基づく傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の地震応答解析と杭応力評価, 日本建築学会構造系論文集 第 84 巻 第 756 号, pp.149-159, 2019.2
- 8) TAKAHIRA, T., TOBITA, Y., WANG, X., NISHIURA, R., NAGANO, M.: Torsional Responses of Buildings Constructed on Soil with Inclined Bedrock Inferred from Recorded Motions, Proceedings of 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, No.2g-0039, 2020.9 (in English)
- 9) NISHIURA, R., NAGANO, M., TOBITA, Y., UEBAYASHI, H.: Dynamic Properties of a Seismically-Isolated Building Constructed on Soil with Inclined Bedrock from Vibration Measurements, Journal of Association for Earthquake Engineering, Vol.19, No.6 (Special issue), pp. 6-181-6-192, 2019.10 (in Japanese)
西浦遼, 永野正行, 飛田喜則, 上林宏敏: 振動計測に基づく傾斜基盤上に建つ免震建物の振動性状に関する検討, 日本地震工学論文集, 第 19 巻, 第 6 号 (特集号), pp.6-181-6-192, 2019.10
- 10) YAMAUCHI, T., TOBITA, Y., NISHIURA, R., UEBAYASHI, H., WANG, X., NAGANO, M.: Dynamic Characteristics of Seismically Isolated Building on Soil with Inclined Bedrock using Microtremor Measurement Part3 Study on the warping torsional vibration mode of superstructure, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure- II, pp.703-704, 2019.7 (in Japanese)
山内豊英, 飛田喜則, 西浦遼, 上林宏敏, 王欣, 永野正行: 常時微動計測に基づく傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の動特性 その 3 上部構造のワーピング振れ振動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II pp.703-704, 2019.7
- 11) KOMURO, T., IGUCHI, M.: Study on Dynamic Behavior of Buildings on Embedded Fill or Cut Soil Based on Microtremor Measurement, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.13, No.26, pp.475-480, 2007.12 (in Japanese)
小室達也, 井口道雄: 常時微動測定に基づく埋土・切土地盤上に建つ建築物の振動性状に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第 13 巻, 第 26 号, pp.475-480, 2007.12
- 12) Kozo System, Inc.: Elasto-plastic Analysis of Arbitrary Shape 3D Frames, SNAP ver. 7 Technical Manual, 2019.4 (in Japanese)
株式会社構造システム: 任意形状立体フレームの弾塑性解析 SNAP ver.7 テクニカルマニュアル, 2019.4
- 13) MORII, T., TAKEUCHI, S., YOSHIDA, K., SARUTA, M. and ADACHI, K.: Effect of Equivalent Stiffness of Seismic Isolation Device on Environmental Vibration Assessment. AIJ Journal of Technology and Design, Vol.21, No.49, pp.1101-1105, 2015.10 (in Japanese)
森井雄史, 竹内貞光, 吉田一博, 猿田正明, 安達一喜: 免震部材の微小変形時の等価剛性が環境振動評価に及ぼす影響と簡略的な応答評価法の提案, 日本建築学会技術報告集 第 21 巻 第 49 号, pp.1101-1105, 2015.10
- 14) TOBITA, Y., NAGANO, M., KITAMURA H., SATOH T., SUZUKI K., YAMAUCHI, T.: Seismic response characteristics of seismically isolated building on inclined bedrock subsurface structure based on recorded motions during the 2011 Tohoku earthquake. Part 2 Simulation of ground motion by using 2D FEM and seismic response analysis of structure, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structure- II, pp.589-590, 2016.7 (in Japanese)
飛田喜則, 永野正行, 北村春幸, 佐藤利昭, 鈴木賢人, 山内豊英: 2011 年東北地方太平洋沖地震時の観測記録に基づく傾斜基盤構造に建つ免震建物の地震応答特性 その 2 FEM 解析による地震動シミュレーションと建物の地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.589-590, 2016.7
- 15) Wessel, P., Smith, W. H. F., Scharroo, R., Luis, J. F. and Wobbe, F.: Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans. AGU, 94, 409-410, 2013

TORSIONAL VIBRATION CHARACTERISTICS OF A SEISMICALLY-ISOLATED BUILDING CONSTRUCTED ON AN INCLINED BEARING LAYER INFERRED FROM RECORDED MOTIONS AND RESPONSE ANALYSES

Tomohiro TAKAHIRA^{*1}, *Yoshinori TOBITA*^{*2}, *Ryo NISHIURA*^{*3},
Hiroto UEBAYASHI^{*4}, *Xin WANG*^{*5} and *Masayuki NAGANO*^{*6}

^{*1} Shimizu Corporation (Former Grad. Stud., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science)

^{*2} Structural Design Group, Asanuma Corporation, Dr.Eng.

^{*3} Structural Design Group, Fujita Corporation

^{*4} Assoc. Prof., Kyoto Univ., Dr.Eng.

^{*5} Assoc. Prof., Ashikaga Univ., Dr. Eng.

^{*6} Prof., Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

It is known that a pronounced torsional vibration is induced at buildings that are constructed on inclined bearing layers due to translational vibrations at the foundation with different amplitudes and phase characteristics during an earthquake. Although the seismic performances of the foundations of buildings constructed on inclined bearing layers have been discussed, only a few studies on the vibration characteristics of the whole building system have been performed based on observations and measurements. In this paper, the seismic-response characteristics of a seismically-isolated building constructed on an inclined bearing layer was analyzed using strong motion records and microtremor measurements. To understand the generation mechanism of the torsional vibration of the superstructure generated by the input motion from the foundation slabs, the relationships between the torsional response and input motions from the inclined bearing layer are examined. Firstly, the strong motion records are analyzed to confirm the vibration characteristics of the superstructure. Next, the steady-state vibration of the superstructure is analyzed from the microtremor record. The vibration characteristics, including the warping torsional vibration, are confirmed for each predominant frequency of the superstructure. Finally, we analyzed the torsional response of the building by a 3D-frame model consisting of the superstructure and seismically-isolated layer and a 2D-FEM of the subsurface structure with an inclined bearing layer. The effect of the amplitude and phase difference of the input motions on the generation of the torsional response is also evaluated. The conclusions of this study are summarized as follows:

- 1) From the analysis of the small-amplitude earthquake records, the superstructure has predominant frequencies of 1.2 and 6.8 Hz. The planar steady-state vibrations at these two frequencies are consistent with those of microtremors. It is possible that warping torsional vibrations as well as translation may occur during earthquakes.
- 2) From the microtremor measurement at the superstructure, there are a translation vibration at 1.3 Hz, a torsional vibration around the center axis of the building at 2.2 Hz, a bow-shaped vibration at 6.0 Hz (in which both ends and the center of the building are opposed to each other) and a warping torsional vibration of the building floor slab at 6.7 Hz. The warping torsional vibration is characterized by the twisting of the mat slab of the first floor, leading to an opposite rocking behavior at both ends of the building in the short-span direction and a consequent opposite horizontal movement at the top.
- 3) The effects of the amplitude and phase differences of the input motions on the warping torsional responses around 6.7 Hz of the superstructure were examined by the 3D-frame model and the 2D-FEM ground model. The influence of the amplitude difference of the input motion is small, while the phase difference between the two ends of the building has a large influence on the inducing warping torsional vibration.

(2020年10月9日原稿受理, 2021年2月10日採用決定)