

1. 長さが異なる杭を有する免震建物の地震時の挙動について

— その8 上下方向の振動特性に関する考察 —

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

- Part.8 Study on Vertical Dynamic Characteristics based on Strong Motion and Analysis -

飛田 喜則*1 山内 豊英*1 橋本 拓*2

要 旨

傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物を対象とし、杭基礎、免震層、上部構造および地盤をモデル化し、強震記録を再現する解析手法の構築を行った。また、基盤に種々の地震波が入射した際、上下応答の平面的な振幅分布と位相分布について検討を行った。また、杭基礎の有無を比較し、傾斜基盤を有する地盤における上下動の特性や杭基礎による杭拘束効果が建物応答の上下動特性に与える影響について検討を行った。

その結果、杭基礎や建物の上下拘束によって上下動の振幅が約 1/2 以下まで低減すること、また SV 波、P 波入射時ともに上下動の振幅が低減することを確認した。この傾向は SV 波入射時に顕著であること、P 波入射時には高振動数側になるに従い、また表層地盤の層厚が厚い地点にかけて振幅が低減することなどの傾向が把握できた。

キーワード：傾斜基盤／異種基礎／上下応答／地震応答解析／杭

1. はじめに

一般に、支持基盤の深さが一様でない傾斜基盤上に計画された建物の基礎構造は、直接基礎と杭基礎を併用した基礎形式となる。このような場合、傾斜基盤の深さの違いが表層地盤の地震動特性に影響を及ぼし、その結果、基礎部に振れ振動が加わることが懸念される。一般の免震建物において、水平動に対する検討は多く行われているが、上下動に対する検討はあまり行われていない。また、傾斜基盤の影響なども議論されていない。しかし、環境振動や鉄道振動の観測では 10Hz 以上の高振動数が卓越する

ことがあり、免震建物の上下方向も含めた高振動数による影響を検討することが重要となる。

筆者らは、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物を対象とし、過去に常時微動測定を実施し、水平方向の観測記録では、層厚に応じて振幅が大きくなり、その卓越周期が長くなることなどを示した^{1)~3)}。また、上下動についても傾斜基盤の影響により、水平動と同様に層厚の影響を受け、深くなるほど振動数が低下し、かつ振幅が大きくなること、地盤から基礎部へ入力損失があること、観測記録に基づいて建物の中央部では免震層を介して 1 階の卓

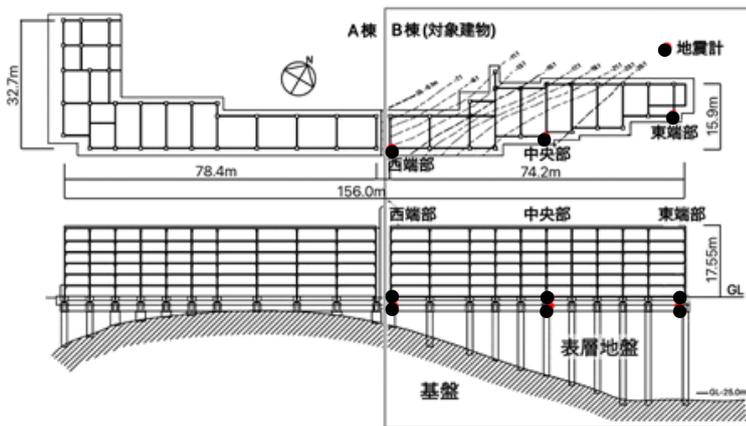


図-1 建物概要および観測点位置図

表-1 建物概要

建築場所	神奈川県逗子市	用途	集合住宅
建築面積	958.6㎡	基準階面積	692.6㎡
階数	地上6階 塔屋1階	軒高	17.55m
上部構造	鉄筋コンクリート造 (基礎免震構造)		
	長辺方向: ラーメン構造	短辺方向: 耐震壁付きラーメン構造	
基礎構造	直接基礎、場所打ちコンクリート杭の併用		

表-2 東端部の地盤概要 (PS 検層)

深さ (GL-m)	地層	湿潤密度 (kN/m ³)	N値	弾性波速度 (m/s)	
				Vs	Vp
0 ~ 3.50	土丹塊 土丹塊混じり粘土	16.67	2~15	140	1400
3.50 ~ 8.40	シルト	17.65	2~3		
8.40 ~ 19.45	シルト	16.67	2~3		
19.45 ~ 23.70	粘土質シルト	17.65	3~4		
23.70 ~ 25.10	砂混じり土丹塊	18.63	14	270	1560
25.10 ~ (31.18)	土丹(基盤)		50以上	730	1910

*1 技術研究所構造研究グループ *2 東京本店設計部 構造第2グループ

越振動数が 11Hz 程度であることを示した⁴⁾⁵⁾。

本報告は、対象建物の上下方向の応答について解析的な検討を行い、杭基礎の有無が上下動の特性に与える影響や傾向について検討した結果を述べる。まず対象とする建物における杭基礎、免震層、上部構造および地盤をモデル化し、強震記録の再現解析を行う。次に解析モデルにより、基盤に種々の地震波が入射した際の上下応答の平面的な振幅分布と位相分布を算出し、傾斜基盤を有する地盤における上下動の伝播特性について検討する。さらに、杭基礎や建物による上下拘束効果の有無を比較し、上下拘束の有無が入力動や建物応答の上下動特性に与える影響に関する検討を行う。

2. 対象建物概要

2.1 建物概要と地震観測

対象建物の概要を表-1に、また1階平面、地盤・杭を含む断面の概略図を図-1に示す。本建物は、6階建ての鉄筋コンクリート造の集合住宅である。構造形式は、長辺(EW)方向がラーメン構造、短辺(NS)方向が耐震壁付きラーメン構造であり、1階と基礎の間に免震装置を配置した基礎免震構造である。上部構造では長辺方向の中央にエキスパンションジョイントを設けてA棟、B棟に分割している。以下の検討ではB棟を対象とする。B棟の長辺方向および短辺方向の長さは、約74.2mおよび約15.9mである。

建物の東端部の地盤概要およびPS検層による弾性波速度を表-2に示す。本建物の地盤は、基盤と表層地盤から成る2層地盤である。基盤は弾性波速度が730m/sの土丹層であり、表層地盤は弾性波速度が140m/sのシルト主体の沖積層である。ボーリングデータから推定した基盤深度分布図を図-1の平面図に重ねて示す。基盤は敷地内で東西に傾斜しており、約23.5mの高低差を有し、その最大傾斜角度は最大30°程度である。基礎形式は、西端部では直接基礎、それ以外は基盤までの深さに応じて長さが異なる場所打ちコンクリート杭である。

2.2 免震装置概要

免震装置は、高減衰積層ゴムを各柱下に1基の計24基設置している。免震装置の配置を図-1に示す。高減衰積層ゴムは、ゴム部の総厚が160mmまたは162mm、ゴム直径が650mm~900mmである。免震層の剛心と上部構造の重心が一致するように計画している。

2.3 地震観測概要

地震観測点を図-1に●で示す。地震観測点は、B棟

の基礎部および上部構造の免震層直上の1階床部のそれぞれ西端部、中央部および東端部の計6点である。中央部では水平2方向(EW、NS)および上下(UD)方向、両端部では短辺(NS)方向を観測している。サンプリング周波数は100Hzである。本報告では主にUD方向を対象とする。

3. 振動・強震観測による地盤・建物の上下動特性

ここでは、前報⁶⁾で示した対象建物で実施した常時微動計測による上下方向の振動特性について紹介する。

図-2は、上下動について、直接基礎となる西端部に対して、層厚が厚くなる建物の中央付近、東端部およびそこから約10m離れた地盤上のフーリエスペクトル比を示している。これより、地盤面では表層地盤が厚くなる東端部にかけて上下動の振幅が増大する傾向を示した。また、図-3は、地盤面に対する基礎底版のフーリエスペクトル比を示す。これより、直接基礎では高振動数域まで入力損失が見られないが、杭基礎では3Hz以上で入力損失が確認できる。なお、6Hzでの大きな増幅は、上部構造の影響によるものである。

次に強震記録による上下方向の振動特性を紹介する。本建物の中央部で観測された比較的大きな加速度を示した観測波による基礎底版に対する1階床のフーリエスペクトル比(平滑化はParzen Window、バンド幅0.2Hzとした)を、それらの平均値を図-4に示す。これより、基礎部に対する1階床部での卓越振動数は概ね11.0~11.3Hzの範囲であった。一方、常時微動計測

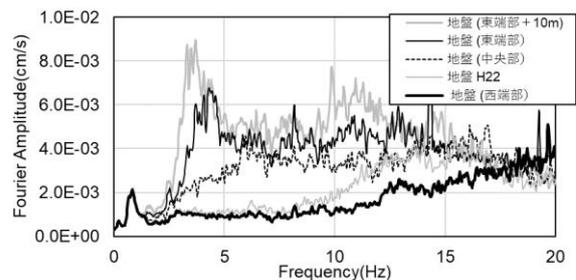


図-2 地盤の上下方向の西端部に対するフーリエスペクトル比損失

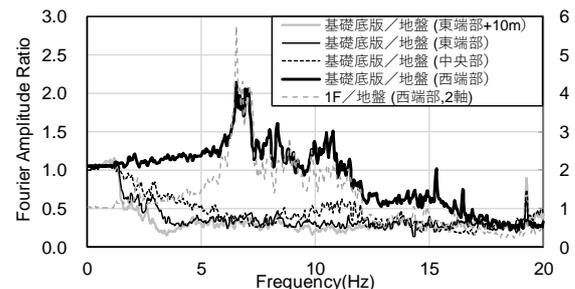


図-3 地盤から基礎部への上下動の入力

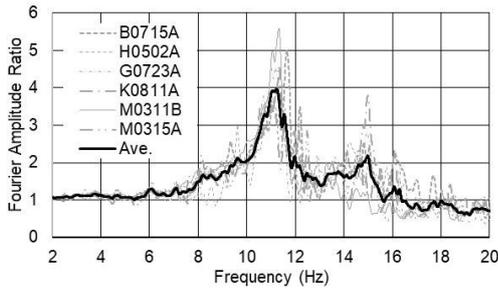


図-4 観測波による上下方向の卓越振動数

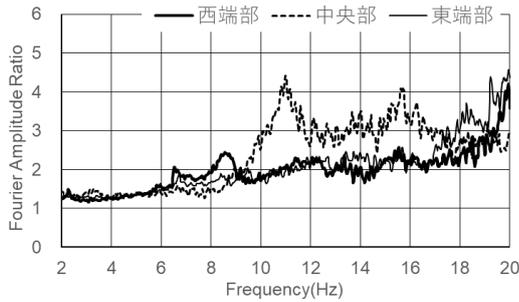


図-5 常時微動時の上下方向の卓越振動数

によって得た基礎底版に対する 1F の計測点（西端部、中央部、東端部）における上下動のフーリエスペクトル比を図-5 に示す。これより、中央部では 11.0Hz 付近に卓越が見られたが、両端部では明瞭な卓越が見られなかった。よって、強震時における両端部の応答は強震観測点が無いため確認ができていないが、図-4 に示したように、強震時に中央部の観測点で約 11Hz に卓越が見られたものの、両端部の振幅は中央部に比べて小さいと考えられた。

4. 解析モデルによる検討

4.1 地盤解析モデルの概要

図-1 に示したように、基盤の傾斜方向と建物軸の角度が異なるため、建物軸を時計回りに 60 度回転させ

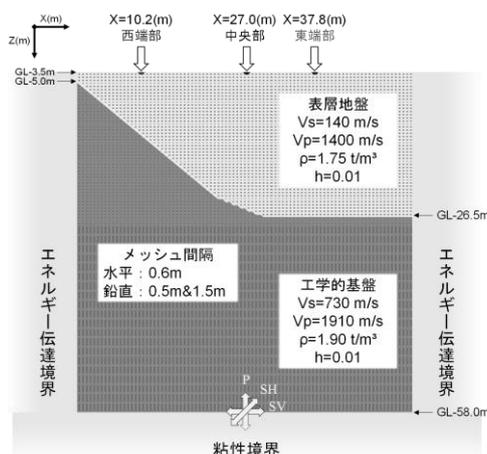


図-6 地盤のメッシュモデル

ることにより、直下の地盤は、傾斜基盤を含む 2 次元の 2 層地盤と見なす。これを自由地盤とし、2 次元の FEM 解析を行う。作成した地盤のメッシュモデルを図-6 に示す。対象領域は水平方向に 53.4m、鉛直方向に 54.5m とし、対象振動数 35Hz としメッシュ間隔を想定する。モデルの左右領域にはエネルギー伝達境界、下方領域には粘性境界を設ける。構築したモデルに対し、SH 波、SV 波、P 波が基盤に鉛直入射した際の地盤応答を評価する。ここで、基盤入射波と地盤応答波の成分は、SH 波入射時には地盤の Y 方向のみに、SV 波入射時は X-Z 面内に、P 波入射時には X-Z 面内となる。

4.2 杭基礎・免震層・上部構造のフレームモデル

杭基礎・免震層・上部構造を一体とした 3 次元フレームモデルを図-7 に示す。解析モデルは、上部構造の柱、梁は曲げ、せん断、軸剛性を考慮した線材モデル、床部材は平面要素、耐震壁は壁エレメント置換モデルとする。ここで、各要素を弾性とし、各層スラブは非剛床とする。高減衰積層ゴムの水平ばねは、強震記録から評価した高減衰積層ゴムの微小変形時の剛性⁷⁾とし、鉛直ばねは設計時の剛性を用いて単軸モデルで表現し弾性とする。杭基礎は、曲げ、せん断、軸剛性を考慮した線材モデルで表現し、弾性とした。

また、地盤との相互作用効果を考慮するため、杭基礎の各質点の周辺に自由地盤の質点を設け、杭周地盤ばねとして 3 方向に対して剛性を持つ弾性ばねをつないだ。杭周地盤ばねの剛性、減衰の算出には Gazetas、Francis、Randolf による式⁸⁾を用いた。

水平応答解析時の杭基礎、免震層、上部構造の内部粘性減衰は免震層下部固定時の各方向 1 次固有周期に対しそれぞれ 1%、1%、2%、上下応答解析時は同条件の上下 1 次固有周期に対しそれぞれ 1%、15%、2%とし

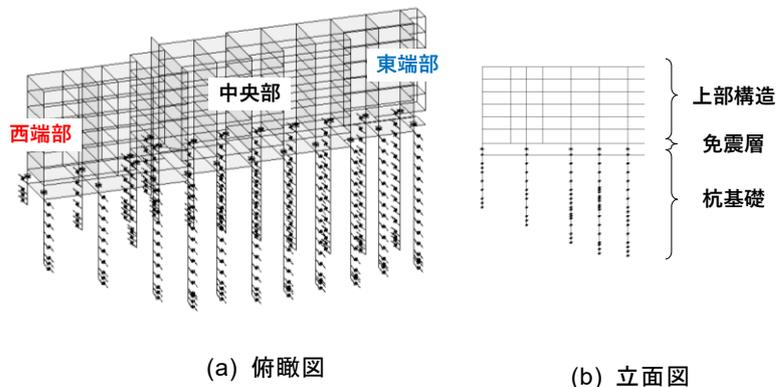


図-7 建物・杭モデルの俯瞰図および立面図

た。免震層の上下減衰定数は既往文献 9)を参考とし、また応答計算による解析波と観測波が概ね整合する値とした。

基礎固定時の固有値解析による上下方向の 1 次振動モードを図-8に示す。固有値解析により得られた中央部が卓越する上下 1 次固有振動数は 11.2Hz であり、図-5で示したように、両端部に比べて中央部が大きくなる振動モードとなった。この傾向は、微動時、強震時に確認された振動数と概ね一致しており、本建物のようなやや長大な建物では、上下動による応答は建物全体で一様ではないと考えられる。

4.3 解析モデルを用いた強震記録の再現解析

下記(a)~(c)の方法により、観測波の再現を行い、解析モデルの妥当性を確認する。

(a) 自由地盤の伝達特性

まず、地盤モデルから算出する自由地盤の伝達関数 [T]を用いて、式(1)で自由地盤応答を求める。

(b) 杭基礎を考慮した伝達特性

杭基礎がある場合の伝達関数の算定方法を以下に示す。まず、任意の基盤波(リッカー波)によって算出した自由地盤応答を算定する。次に、それらを建物・杭モデルのうち基礎床版より上部を除去した杭基礎・基礎床版からなるモデルに杭周地盤ばね外より多点入力し、基礎底版位置での応答波を算出する。次に、この時の基盤波に対する建物基礎底版各免震装置位置における応答波のフーリエスペクトル比を杭基礎がある伝達関数[T*]として評価する。ただし水平方向の地盤応答に関して、杭基礎による影響は小さいと仮定して自由地盤の伝達関数と同様とする。

(c) 観測波の再現

本解析手法により本建物で観測された強震記録の再

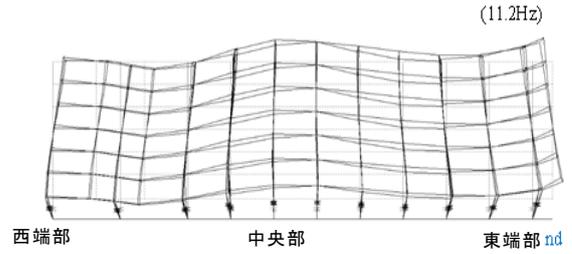


図-8 上部構造の上下 1 次振動モード

$$\begin{Bmatrix} U_{NS}^f \\ U_{EW}^f \\ U_{UD}^f \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} I_{SH} \\ I_{SV} \\ I_P \end{Bmatrix}, \quad [T] = \begin{bmatrix} T_{SHNS} & T_{SVNS} & T_{PNS} \\ T_{SHEW} & T_{SVEW} & T_{PEW} \\ 0 & T_{SVUD} & T_{PUD} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$U_{NS}^f, U_{EW}^f, U_{UD}^f$: NS、EW、UD 方向の自由地盤応答

I_{SH}, I_{SV}, I_P : SH、SV、P 方向の基盤波

[T]: 自由地盤における基盤波に対する伝達関数マトリクス
 T_{SHNS}, T_{SHEW} : SH 波入射時の NS、EW 方向の自由地盤の伝達関数

$T_{SVNS}, T_{SVEW}, T_{SVUD}$: SV 波入射時の基盤波に対する自由地盤 NS、EW、UD 方向の伝達関数

$T_{PNS}, T_{PEW}, T_{PUD}$: P 波入射時の基盤波に対する自由地盤 NS、EW、UD 方向の伝達関数

$$\begin{Bmatrix} I_{SH} \\ I_{SV} \\ I_P \end{Bmatrix} = [T^*]^{-1} \begin{Bmatrix} O_{NS} \\ O_{EW} \\ O_{UD} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} U_{NS}^p \\ U_{EW}^p \\ U_{UD}^p \end{Bmatrix} = [T^*] \begin{Bmatrix} I_{SH} \\ I_{SV} \\ I_P \end{Bmatrix}, \quad [T^*] = \begin{bmatrix} T_{SHNS} & T_{SVNS} & T_{PNS}^* \\ T_{SHEW} & T_{SVEW} & T_{PEW}^* \\ 0 & T_{SVUD}^* & T_{PUD}^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

O_{NS}, O_{EW}, O_{UD} : 当該建物基礎底版中央部で観測された各方向の観測地震波

I_{SH}, I_{SV}, I_P : [T*]を用いて逆算した基盤波

$U_{NS}^p, U_{EW}^p, U_{UD}^p$:

杭基礎を考慮した基礎底版位置での応答

[T*]: 杭基礎を考慮した基盤波に対する伝達関数マトリクス

T_{SVUD}^* : SV 波入射時の基盤波に対する基礎底版位置の UD 方向伝達関数

$T_{PNS}^*, T_{PEW}^*, T_{PUD}^*$: P 波入射時の基盤波に対する基礎底版位置の NS、EW、UD 方向の伝達関数

表-3 再現解析に用いた強震記録の概要

地震符号	概要					震央距離 (km)	最大加速度 (cm/s ²) (絶対値)	
	観測日時	M	震源	深さ (km)	PIT中央部		1F中央部	
G0723A	2005/07/23 16:35:06	6	千葉県北西部	73	59.233	19.94	21.53	
M0315A	2011/03/15 22:32:04	6.4	静岡県東部	14	79.335	10.63	13.94	

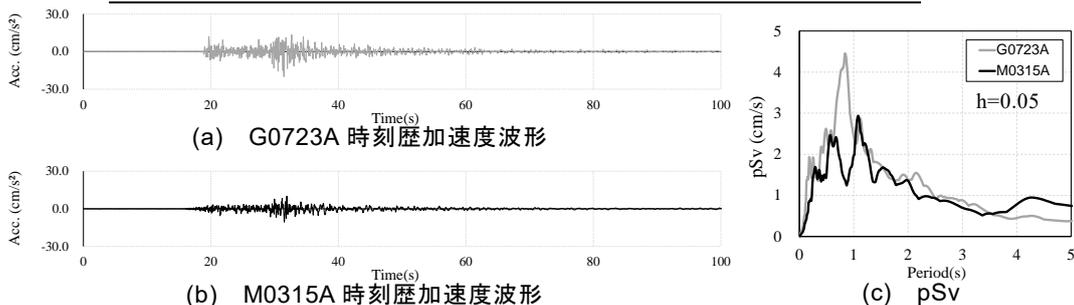


図-9 再現解析に用いた強震動記録の加速度波形と pSv (基礎底版中央部・UD)

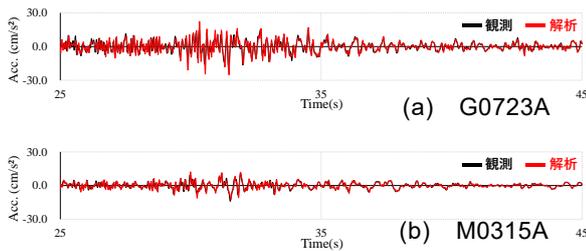


図-10 再現解析結果(加速度波形・1F 中央部・UD)

再現解析を行う。まず、基礎底版中央部で得られた強震記録の加速度波形と $[T^*]^{-1}$ を用いて式(2)によって基盤波を推定し、基盤波と $[T^*]$ を乗じて基礎底版各免震装置位置における加速度波形を算定する。次に、各免震装置位置で得た基礎底版応答波を、先述した建物・杭モデルのうち免震層より下部を除去した免震層、上部構造からなるモデルの各免震装置位置に多点入力し、時刻歴応答解析により 1F の応答波を算定する。

解析には 2000 年 4 月から 2017 年 8 月まで観測された強震記録の中で比較的上下動の最大加速度が大きく、短周期成分が優勢な 2 記録を用いた。これらの概要を表-3 に、基礎底版中央部における加速度波形および擬似速度応答スペクトル (pSv) を図-9 に示す。算定した中央部における 1F 応答波を観測地震波と比較した結果 (時刻歴加速度波形) を図-10 に示す。解析波と観測地震波はほぼ重なっていることからモデルの妥当性を確認できた。

4.4 杭基礎や建物による上下拘束効果

本項では、杭基礎や建物の上下拘束が基礎底版と 1F の上下動特性に与える影響について検討を行う。基礎底版および 1F における上下動の振幅分布および位相分布は、杭基礎や建物による拘束が無い自由地盤を杭周地盤ばねに入力した場合 (以降、Case1 と称す)、杭基礎や建物による拘束を考慮した場合 (以降、Case2 と称す) について検討する。

まず、Case1 と Case2 の伝達関数 T_{SVUD} と T_{SVUD}^* 、同様に T_{PUD} と T_{PUD}^* の比較を図-11(a)、(b) に示す。図では、Case1 が実線、Case2 が破線とし、それぞれ西端部、中央部および東端部を示している。これより、杭基礎なしに比べて杭基礎がある場合の値は大きく低減し、杭基礎による上下拘束効果は大きいと言える。また、この傾向は特に SV 波入射時に励起される上下応答に対して顕著に見られた。

4.5 上下動の平面振幅分布への影響

Case1 における基礎底版位置での上下動は、地盤 FEM 解析によって算出した自由地盤の伝達関数 $[T]$ に前項

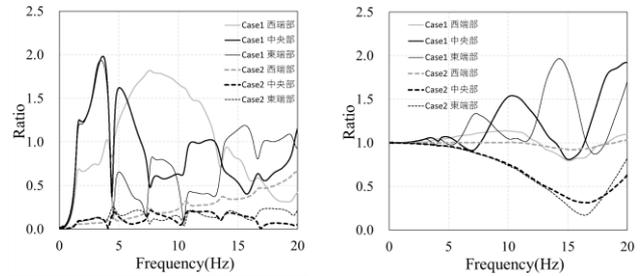


図-11 杭基礎の有無による伝達関数の比較

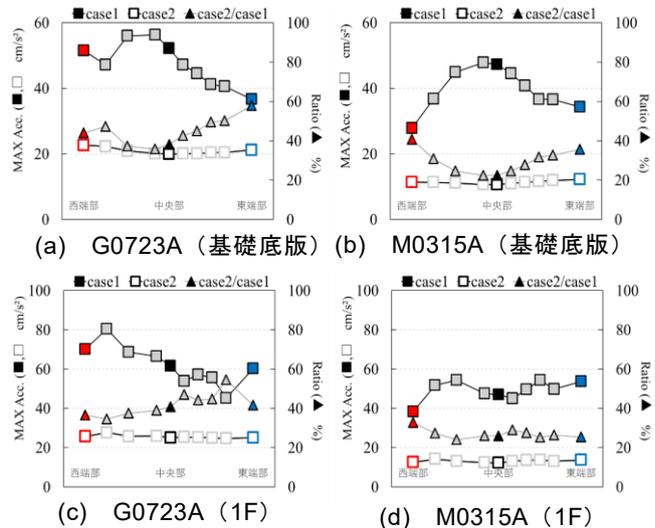


図-12 再現解析時の最大加速度分布

で算出した基盤波を乗算して求め、この波を免震層、上部構造からなるモデルの各免震装置位置に多点入力し、時刻歴応答解析を行うことで、1F の上下応答を算出した。基礎底版および 1F の最大加速度分布を図-12 に示す。各図では前項の再現解析で使用した 2 記録を対象に、横軸は南側杭列の免震装置位置を示し、縦軸は最大加速度を示す。また同図の縦 2 軸には Case1 に対する Case2 の最大加速度比を百分率で示している。

図-12 より、Case1 に対する Case2 の基礎底版および 1F の各免震装置位置における最大加速度振幅は、G0723A では 30%~60%、M0315A では 20%~40% にまで低減した。このことから、観測地震波では、杭基礎や建物による拘束により、基礎底版および 1F の加速度振幅が約 1/2 以下まで大きく低減することがわかった。

5. パルス性地震動による上下拘束効果の解析的考察

本章では、いくつかの振動数を有する Ricker Wavelet を SV 波または P 波として基盤に鉛直入射した際の自由地盤応答と建物応答を比較し、杭基礎や建物による上下拘束が建物上下応答に与える影響について考察を行う。杭基礎や建物による拘束の有無をパラメータと

し、基礎底板と 1F における上下動の平面振幅分布を比較する。

5.1 基盤波および解析手法の概要

基盤に入射する Ricker Wavelet は、最大振幅を 100cm/s^2 、時間刻みを 0.001s の加速度波形とした。また、中心振動数は、当該建物の水平一次固有振動数に近い 1.25Hz 、当該建物で観測されたワーピング振れ振動¹⁰⁾の卓越振動数に近い 6.25Hz 、上下次固有振動数である 11.2Hz 、さらに高振動数成分として 15.0Hz に設定した。設定した Ricker Wavelet の加速度波形を図-13 に示す。Case1 における基礎底板および 1F の上下動は 4.3 節と同様の方法で求めた。比較した解析ケースを表-4 に示す。

5.2 免震装置位置による上下動特性の差異

中心振動数が 11.2Hz の Ricker Wavelet を入射した際の、各解析ケースにおける PIT 南側杭列における西端部、中央部、東端部の時刻歴加速度波形を図-14 に示す。図-14(a)より、SV 波入射時の自由地盤応答である Case1-SV では、西端部と東端部の上下波形のピークに約 0.097s の時間差が見られる。これは西端部付近の傾斜境界面で SV 波入射により上下動を伴うレイリー波が励起され、東端部へ伝播することによるものである。図-14(c)より、杭基礎・建物を考慮した Case2-SV では、西端部と東端部の上下波形のピークの間隔が約 0.015s に短くなっている。このことから自由地盤で生じる上下動の波動伝播の速度および波形の位相差は、杭基礎・建物の上下拘束の影響により小さくなった。

一方、図-14(b)より、P 波入射時の自由地盤において、西端部と東端部の波形のピークの間隔は顕著に見られない。これは基盤と表層地盤の P 波速度の違いが S 波速度ほど大きくないことが原因と考えられる。図-14(d)より杭基礎・建物を考慮した場合について

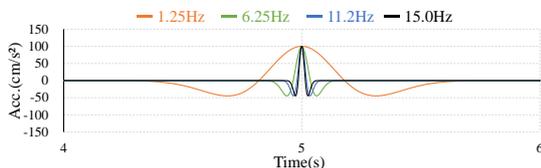


図-13 入射した Ricker Wavelet の加速度波形

表-4 解析ケース

		基盤入力波	
		SV波	P波
拘束条件	Case1 杭なし	Case1-SV	Case1-P
	Case2 杭あり	Case2-SV	Case2-P

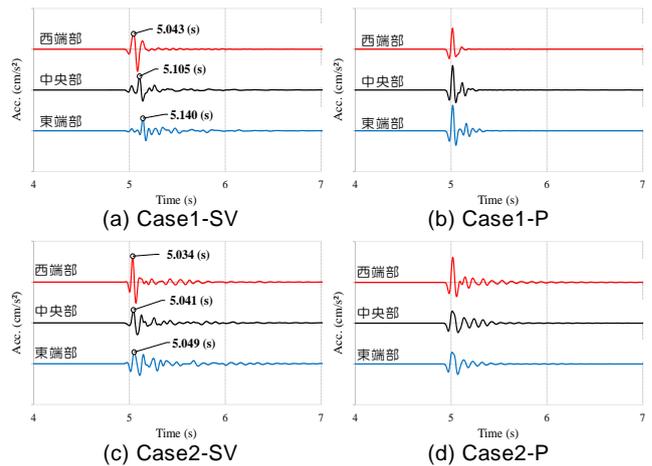


図-14 Ricker Wavelet (11.2Hz) 入射時の基礎底板の加速度波形

も位相差の傾向は大きく変わらない。

Case1 に対する Case2 の最大加速度比分布を SV 波入射時と P 波入射時それぞれについて図-15 に示す。図-15(a)より、SV 波入射時の基礎底板では、いずれの振動数、免震装置位置においても 50%以下まで最大振幅が低減した。また、図-15(b)より、SV 波入射時の 1F においても同様に最大振幅が低減した。このことから、SV 波入射時は振動数や免震装置位置に関わらず、杭基礎や建物の上下拘束によって大幅に振幅が低減することがわかった。

次に、図-15(c)より、P 波入射時の基礎底板では、高振動数になるにつれて、また表層地盤が厚い東端部にかけて上下動の低減が大きい傾向が見られた。 6.25Hz では上部構造の影響を受け、基礎底板の上下動振幅が大きくなる傾向が見られるが、 11.2Hz 以上の高

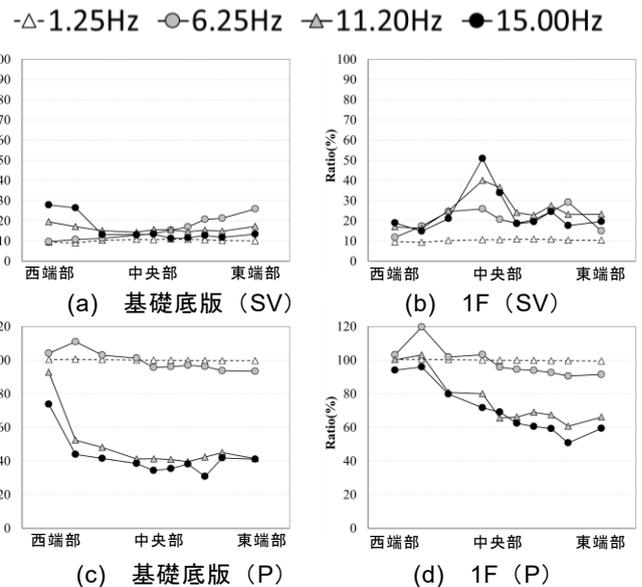


図-15 最大加速度比分布 (Case2 / Case1)

振動数側では上下振動モードによる上部応答の影響により、逆に振幅が小さくなる傾向を示した。また図-15(d)より、P波入射時の1Fにおいても同様の傾向を示した。このことから、P波入射時は杭基礎や建物の上下拘束による振幅低減は見られるが、高振動数側になるにつれて、また表層地盤の層厚が厚い東端部にかけて振幅がより低減した。

6. まとめ

本報告では、傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物を対象にし、基盤に種々の地震波が入射した際、傾斜基盤を有する地盤における上下動の特性や上下拘束の有無が入力動や建物応答の上下動特性に与える影響に関して検討した。以下に、得られた知見をまとめる。

- 1) 地盤面における常時微動時の上下動の卓越振動数は、表層地盤の層厚が厚い東端部にかけて低くなり、さらにその振幅が増大する傾向があった。また、地盤から基礎底版への上下動の伝達特性は、直接基礎以外の杭基礎が存在する地点では振幅が低減する入力損失の傾向があった。基礎底版に対する1Fの上下動の増幅特性では、建物の両端部では明瞭な卓越は見られないが、中央部では明らかな卓越が見られた。
- 2) 傾斜基盤を有した地盤 FEM モデルおよび杭基礎・免震層・上部構造の一体モデルを構築し、強震記録を再現する手法を確立した。
- 3) 強震時の上下動の振幅は、杭基礎が無い場合に比べて、杭基礎や建物の上下拘束によって約 1/2 以下まで低減することを確認した。
- 4) 杭基礎や建物の上下拘束の影響で SV 波、P 波入射時ともに基礎底版と 1F における上下動の振幅が低減することを確認した。この傾向は SV 波入射時に顕著であり、P 波入射時には高振動数側になるにつれて、また表層地盤の層厚が厚い地点にかけて振幅がより低減する傾向を示した。

【謝辞】

本報告をまとめるにあたり、微動測定および地震観測を承諾頂いた本建物の住民の方々、東京理科大学理工学部建築学科永野正行教授にはご指導いただき、同研究室修士坂出潤弥氏には資料の整理にご協力いただき、計測では研究生諸氏にご協力をいただきました。ここに記して厚く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 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揺れ応答の分析、日本建築学会技術報告集 第 23 巻 第 54 号、pp.409-414、2017
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 坂出 潤弥、飛田 喜則、永野 正行他：傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の常時微動および強震観測に基づく上下動の振動特性、日本建築学会大会梗概集(構造Ⅱ)、pp.893-894、2021
- 5) 坂出 潤弥、飛田 喜則、永野 正行：傾斜基盤を有する地盤上に建つ免震建物の上下動特性に関する解析的検討、日本建築学会大会梗概集(構造Ⅱ)、pp.925-926、2022
- 6) 飛田 喜則、山内 豊英、橋本 拓：長さが異なる杭を有する免震建物の地震時の挙動について その 7 上下方向の振動特性、浅沼組技術研究報告 No.31、pp.2-1 - 2-4、2019
- 7) 飛田喜則、山内豊英、王欣、永野正行：観測記録に基づく高減衰積層ゴム支承の剛性の最大経験ひずみ依存性と回復性、日本建築学会学術講演梗概集、pp.771-772、2020
- 8) 日本建築学会：建物の地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、pp.158-170、2006
- 9) 瓜生満、篠原孝治、中山一彦、近藤俊成：免震構造物の上下動地震応答特性に関する研究(その2)免震構造物の上下方向の等価減衰定数、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.641-642、1998
- 10) 高平友博、飛田喜則、西浦遼、上林宏敏、王欣、永野正行：傾斜した基盤上に建つ免震建物の観測と解析に基づく揺れ振動特性、日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 783 号、pp.706-716、2021