# ２．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－

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles
－Part 7　Study on Vertical Vibration Characteristics －

飛田 喜則[*1]　山内 豊英[*1]　橋本 拓[*2]


### 要　旨

基盤が傾斜しているために直接基礎と長さが異なる杭からなる異種基礎によって支持されており、かつ比較的細長い平面形を有する免震建物において、地盤、基礎底版および上部構造について常時微動測定を実施した。前報では、本建物での水平方向の振動には、層厚が深くなるに従って振幅が増幅し、卓越周期が長くなる傾向があることを報告した。本報では、常時微動測定および地震観測記録による上下振動の振動特性について検討した。その結果、上下方向の振動においても層厚との関係について同様の傾向が得られ、地震観測による免震層を介した１階の振動数は大きな経年変化がないことが確認できた。


**キーワード**：免震建物／異種基礎／常時微動測定／上下振動／傾斜基盤

### １．はじめに

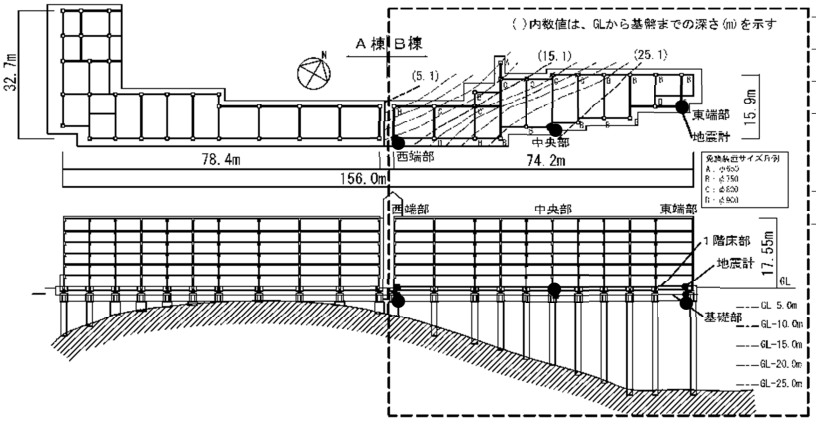
一般に、支持基盤の深さが一様でない傾斜基盤上に計画された建物の基礎構造は、直接基礎と杭基礎を併用した基礎形式となる。このような場合、傾斜基盤の深さの違いが表層地盤の地震動特性に影響を及ぼすことが懸念される。前報において、水平方向の観測記録では、層厚に応じて振幅が大きくなり、その卓越周期が長くなることを示した。また、観測記録から、入力される水平動の加速度の大きさによって、免震装置の水平剛性が異なることが明らかになった。一般の免震建物において、水平動に比べて上下方向の振動（上下振動）に対する検討はあまり行われていない。しかし、環境振動や鉄道振動の観測では10Hz以上の高振動数が卓越することがあり、免震建物の上下振動を含めた高振動数による影響を検討することは重要であり、傾斜基盤の影響などもあまり議論されていない。

本報告は、傾斜基盤を有する地盤上の免震建物について、常時微動測定を行い、それによる地盤上と基礎底版での振動特性について、また観測地震記録に基づいた免震建物の上下振動の卓越振動数等について述べる。

### ２．対象建物

#### 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




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 | 958.6m² | 基準階面積 | 692.6m² |
| 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/m³) | N値 | 弾性波速度(m/s) Vs | Vp |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 ～ 3.50 | 土丹塊<br>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 技術研究所建築構造研究グループ　*2 東京本店設計部　構造第２グループ

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、それぞれ約 74.2m、約 15.9m である。

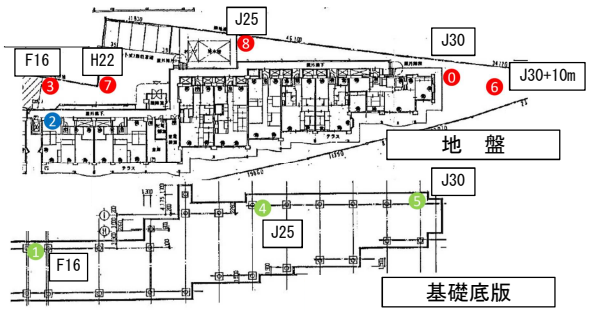
建物の東端部の地盤概要および PS 検層による弾性波速度を**表－２**に示す。本建物の地盤は、基盤と表層地盤から成る 2 層地盤である。基盤は弾性波速度が 730m/s の土丹層であり、表層地盤は弾性波速度が 140m/s のシルト主体の沖積層である。ボーリングデータから推定した基盤深度分布を**図－１**の平面図に重ねて示す。基盤は敷地内で東西に傾斜しており、約 23.5m の高低差を有し、その最大傾斜角度は最大 30°程度である。基礎形式は、西端部では直接基礎、それ以外は基盤までの深さに応じて長さが異なる場所打ちコンクリート杭である。

免震装置は、高減衰積層ゴムを 24 基設置しており、そのゴム部の総厚が 160mm または 162mm であり、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。なお、設計時の固有値解析による周期は、免震装置のせん断歪が 10%において 1.66 秒である。

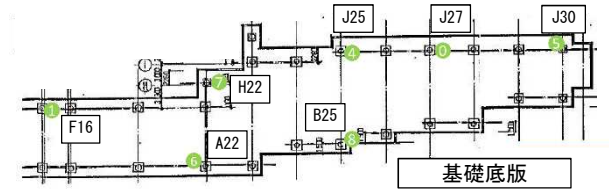
地震観測点を**図－1** に●で示す。地震観測点は、B 棟の基礎部および上部構造の免震層直上の 1 階床部のそれぞれ西端部、中央部および東端部の計 6 点である。中央部では水平 2 方向（EW、NS）および上下(UD)方向、両端部では短辺(NS)方向を観測している。サンプリング周波数は 100Hz である。本報告では UD 方向を対象とする。

### 2.2　常時微動測定概要

傾斜基盤が地盤および基礎底版の振動特性に及ぼす影響を検討するため、常時微動測定を実施した。常時微動の測定点を**図－２**に示す。測定点は、B 棟付近の地盤、同棟の基礎底版とした。常時微動測定は、測定機器の都合などによって２回に分けて実施している。１回目の測定は主に建物の北側の地盤の振動調査を目的とし、西端部にあり層厚の最も浅い測定点 F16、そこから層厚が深くなる H22、建物中央付近 J25、建物の東端部付近の J30、さらに建物から約 10m 離れた G30+10m の地盤上の 5 地点とし、同時に、基礎底版上の西端部にあり直接基礎となる F16、杭基礎の中央部（J25）および東端部(G30)の３地点とした。２回目は基礎底版の各点の振動調査を目的とし、北側の杭列上の 5 点および南側の杭上の 2 地点とした。各測定点の測定方向は、水平 2 方向（EW、NS）および上下(UD)方向であり、建物軸に合わせている。サンプリング周波数は 200Hz であり、測定時間は 40 分である。なお、測定は、日中に行っているため、周辺の雑振動なども含まれるが、測定記録からそれらの影響の小さい部分を抽出して検討した。




(a) 地盤と基礎底版の測定点（1 回目）




(b) 基礎底版の測定点（2 回目）

**図－２　常時微動測定点**

## ３．測定結果

### 3.1　地盤の振動特性

地盤上の測定点の上下振動のフーリエ振幅スペクトルを**図－３**に示す。さらに、測定点(F16)で基準化したフーリエスペクトル比を**図－４**に示す。

**図－３**より、上下振動の振幅は，水平動と同様に表層地盤が深くなる東端部ほど増大する。**図－４**より、表層地盤が最も浅い西端部に比べて、層厚がやや深くなる測定点 H22 では 10Hz～16Hz 付近がやや増幅し、さらに深くなる中央部（測定点 J25）ではそれよりも低い振動数域 5～10Hz 付近で振幅が増幅し、この振動数は最も層厚が深い J30 や J30+10m 付近でも同程度の増幅を示している。また、東端部 J30 では 4.4Hz が増幅し、建物から離れた測定点(J30+10m)ではそれより低い振動数 3.7Hz が増幅する。このように、地盤の層厚が深くなるに従って上下振動の卓越振動数が低振動数側となり、振幅が増幅する傾向がある。ただし、測定点 J30 と測定点 J30+10m は、地盤調査によると、それらの地盤層厚はほとんど変わらないにも関わらず、振動数に明確な違いがある。この傾向は水平方向の卓越周波数も同様であり、その要因は、傾斜基盤による影響や建物の基礎による影

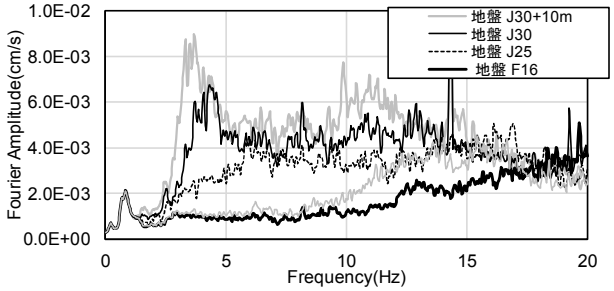
響が考えられるが、現時点では明らかではない。

### 3.2　基礎底版の振動特性

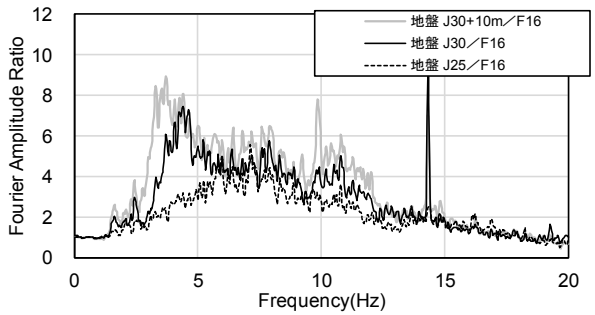
基礎底版のフーリエスペクトル比（直接基礎である測定点 F16 で基準化）を**図－５**に示す。**図－５**(a)は建物の北側の杭列上、**図－５**(b)は南側の杭列上を示す。図より、地盤と比べると、基礎底版の卓越振動数は明確ではなく、高振動数域の振動が減少し、また北側および南側杭列いずれでも 4.5～6.0Hz であり、この振動数域において、層厚が深くなるに従ってやや増幅する傾向がものの、基礎底版全体として同振幅程度である。ただし、この振動数域において、北側杭に比べて南側の卓越振動数には 5Hz 付近の振動成分が見られ、南北の杭長の違いによる卓越振動数の違いなどが観測された。

### 3.3　地盤と基礎底版の入力損失

１回目の測定における各軸線における地盤に対する基礎底版のフーリエスペクトル比を**図－６**に示す。これより、西端部以外の杭基礎部分では 2Hz 付近から高振動数において地盤から基礎底版へ入力損失によって振幅が低下する。一方、西端部の直接基礎(F16)は、10Hz 以下の振動数域ではあまり低下せず、10Hz 以上の高振動数で入力損失がある。また、西端部では 6.5Hz に明瞭な卓越振動

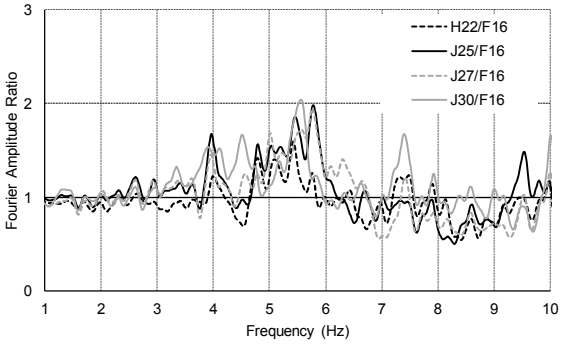



**図－３　地盤の上下振動のフーリエスペクトル**

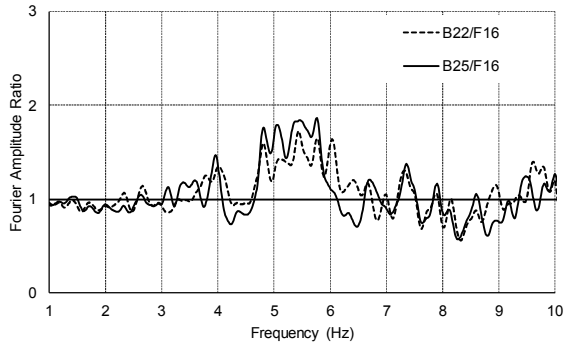



**図－４　地盤の上下振動の西端部（F16）に対するフーリエスペクトル比**

数がある。本図に地盤と１階床のフーリエスペクトル比（2 軸）を示す。この卓越振動数と、地盤から基礎底版への卓越振動数が一致するため、これらは上部構造による影響であると考えられる。このように杭基礎と直接基礎で明確な違いがある。

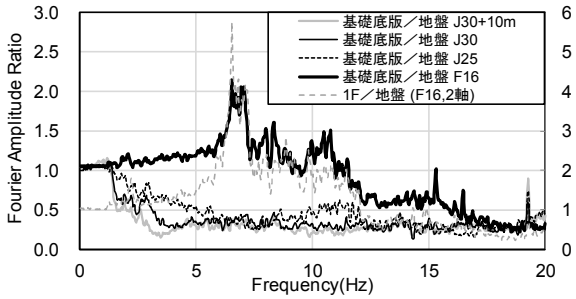



(a) 北側杭




(b) 南側杭

**図－５　基礎底版の上下振動の西端部（F16）に対するフーリエスペクトル比**




**図－６　地盤に対する基礎底版のフーリエスペクトル比**

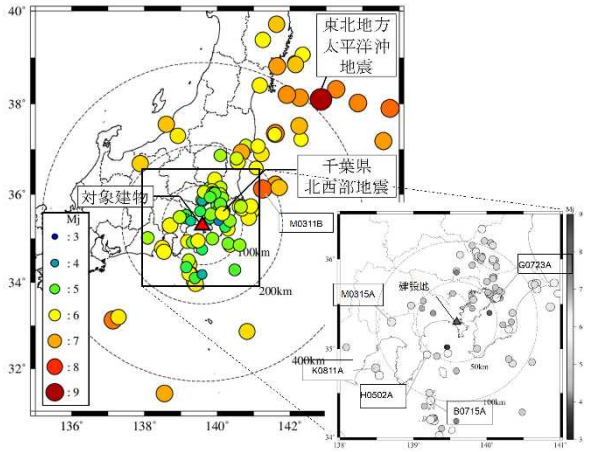
## ４．観測地震波による１階の卓越振動数

### 4.1　伝達関数による検討

**図－７**に本建物で観測した地震の震央分布を示す。また、比較的大きな加速度を示した地震の概要を**表－３**に示す。これらの観測地震動によるフーリエスペクトル（平滑化は Parzen Window, バンド幅 0.2Hz とした）による基礎底版に対する１階床の伝達関数を**図－８**に示す。

**図－８**より、観測地震動によって卓越振動数にばらつきが見られるが、基礎部に対する 1 階床部での卓越振動数は概ね 11.0Hz である。設計値による上下振動の振動数 13Hz に比べて実測による卓越振動数は低いが、本建物に

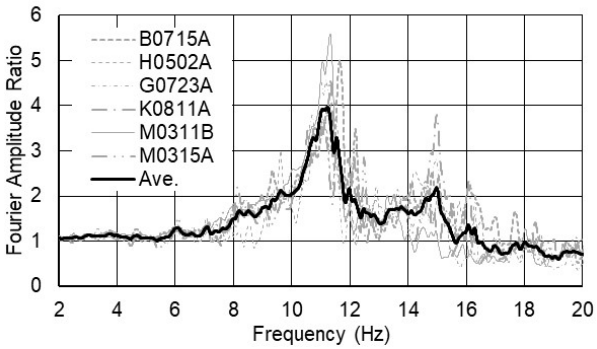
おいて鉄道振動などによる問題は生じていない。



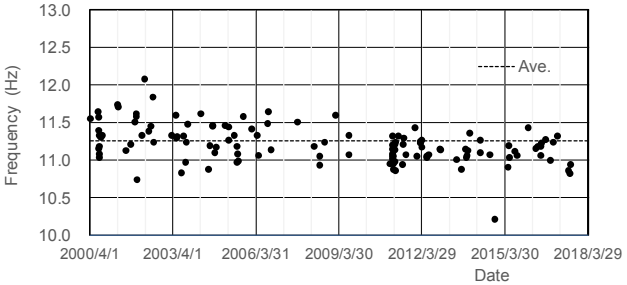

図－７　観測地震の震央分布

表－3　対象地震

| 地震符号 | 震源概要 | | | | | 震央距離(km) | 最大加速度(UD)(cm/s²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 観測日 | 観測時間 | Mag. | 位置 | 深さ(km) | | 基礎 | 上部 |
| B0715A | 2000/07/15 | 10:30:54 | 6.3 | 新島近海 | 5 | 82 | 8.09 | 8.13 |
| G0723A | 2005/07/23 | 16:35:06 | 6.0 | 千葉県北西部 | 73 | 66 | 20.72 | 22.28 |
| H0502A | 2006/05/02 | 18:24:43 | 5.1 | 伊豆半島東方沖 | 15 | 43 | 7.84 | 8.97 |
| K0811A | 2009/08/11 | 5:07:25 | 6.5 | 駿河湾南部 | 23 | 128 | 8.59 | 8.91 |
| M0311B | 2011/03/11 | 15:16:17 | 7.7 | 茨城県東方沖 | 43 | 199 | 12.50 | 12.94 |
| M0315A | 2011/03/15 | 22:32:04 | 6.4 | 富士山系 | 14 | 97 | 10.44 | 13.91 |




図－８　観測波による上下振動の
フーリエスペクトル比




図－９　上下振動の卓越振動数の経年変化

### 4.2　経年変化による上下振動の卓越振動数

**図－９**に観測を実施した 2000 年から 2017 年 8 月までの上下振動の卓越振動数の時系列を示す。全観測地震動による上下振動の卓越振動数(平均)は 11.26Hz である。

また、上下振動の卓越振動数は、ばらつきはあるものの経年と共に振動数が大きく変化していないことが確認できた。

## ５　まとめ

傾斜基盤上に建つ免震建物を対象に，常時微動測定に基づき地盤，基礎底盤の上下振動の振動性状について分析し、さらに観測地震動に基づいて免震層の上下振動の卓越振動数について調査を行った。その結果、以下の知見を得た。

① 地盤上の卓越振動数は、水平振動と同様に、層厚が増加するに伴って低くなり、また、振幅が増大する傾向があった。

② 3Hz以上の高振動数の振動には、地盤から基礎部への入力低減が確認できた。ただし、直接基礎と杭基礎ではその傾向が異なった。

③ 観測地震動による免震層（1階）の卓越振動数は、ばらつきがあるものの経年的な変化が少ない。

**【謝辞】**

本計測および分析には、東京理科大学理工学部建築学科永野研究室のご協力をいただきました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。