

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5 常時微動測定に基づく考察—

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

—Part5 Study on Response of Ambient Vibration Records —

飛田 喜則*1 山内 豊英*1 橋本 拓*2

要 旨

基礎が傾斜しているため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、かつ比較的細長い平面形を有する免震建物において観測された地震記録を基に、基礎部の振れ挙動、さらに免震層を介した上部構造の応答について検討してきた。この度、本建物において、常時微動測定を実施する機会を得て、その基本的特性について検討した。

その結果、地盤の層厚に応じて振幅が増幅する傾向にあること、建物の振動モードは、単純な並進や剛体としての振動モードだけでなく、建物の平面形状が細長いために弓なりの振動モードなどがあることが把握できた。また、強震記録と常時微動時の周期の比較により、免震装置のせん断歪 10%時の設計周期に比べて、常時微動時の周期が約半分程度と短いことがわかった。

キーワード：免震建物／異種基礎／地震／常時微動測定／ねじれ振動

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。これについて多くの解析的な検討がなされ、傾斜基盤の傾斜の上部では振幅が小さいが傾斜の下端部では大きくなるなど複雑な挙動を示すことが知られている。しかし、これら

の検討には、実際の地震記録によってその影響を検討した例は少なく、かつ免震建物を対象として検討した例は少ない。著者らはこれまで、基礎が傾斜しているため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、かつ比較的細長い平面形を有する免震建物において観測された地震記録を基に、基礎部および上部構造の応答について検討してきた^{1)~3)}。本報告は、本建物で実施した常時微動測定に基づいて、傾斜基盤上に建つ免震建物の振動特性について評価した結果について示す。

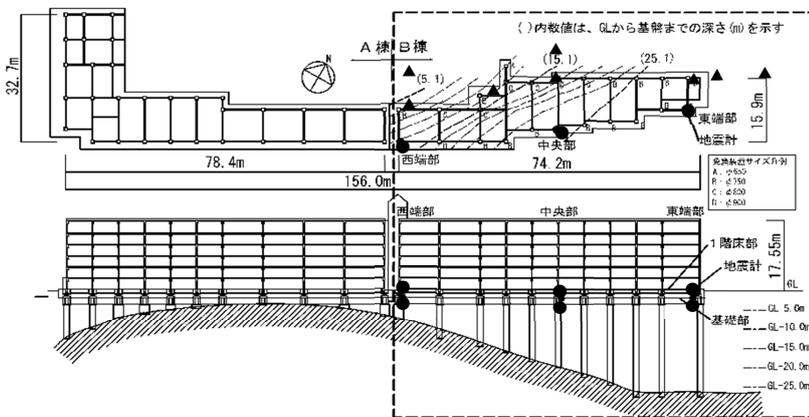


図1 建物概要および観測点位置図

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 | 270 | 1560 |
| 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(基礎) | | 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

2. 対象建物

2.1 建物概要と地震観測

本建物は、神奈川県逗子市に位置している。対象建物の概要を表1に示し、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、基礎と表層地盤から成る2層地盤である。基礎は弾性波速度が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礎深度分布図を図1の平面図に重ねて示す。基礎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、それ以外は基礎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。基礎底深さは、GL-3.5mであり、中央部および東端部の各観測点位置の基礎底から基礎までの深さは、それぞれ約21.5mおよび22.5mである。

2.3 免震装置概要

免震装置は、高減衰積層ゴムを24基設置している。免

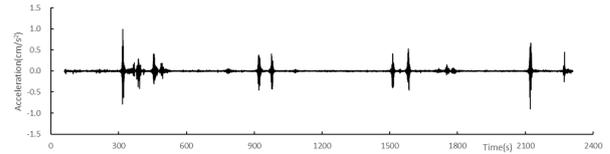
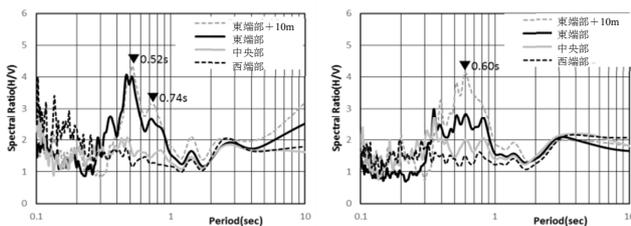


図2 常時微動測定時の加速度波形例

震装置の配置を図1に示す。積層ゴムのゴム部の総厚が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。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。

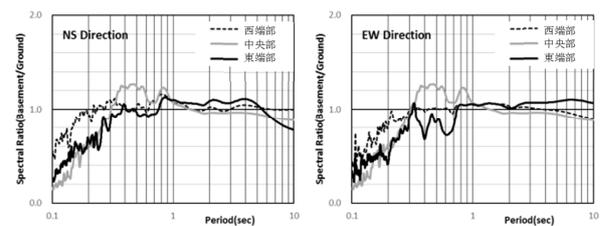
2.4 常時微動観測および地震観測概要

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。今回実施した常時微動測定の測定位置を図1に▲で示す。測定位置は、①建物の北側の周辺地盤、②建物の基礎部、③上部構造として1階床である。測定機器の都合によって、各測定点の全てで同時観測することができなかつたため、①②③の測定を3回に分けて実施している。それぞれ測定位置は、地震計に合わせて西端部、中央部および東端部、さらに西端部と中央部の中間の位置。建物の東端部から東側に約10m離れた表層地盤上にも追加した。サンプリング周波数は200Hzである。図2に測定した加速度波形の一例を示



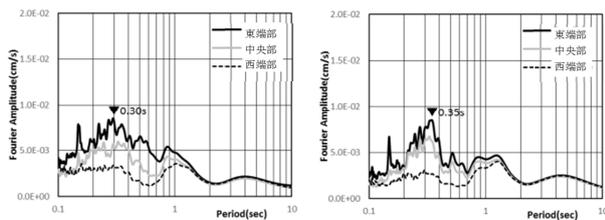
(a) NS方向 (b) EW方向

図3 地盤のH/Vスペクトル



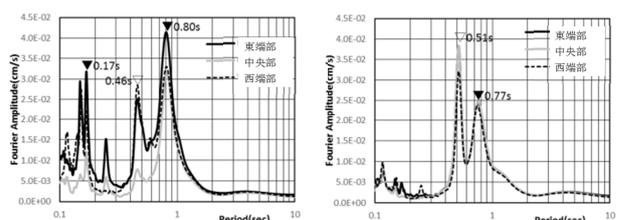
(a) NS方向 (b) EW方向

図5 フーリエスペクトル比(1階床/地盤)



(a) NS方向 (b) EW方向

図4 1階床のフーリエスペクトル



(a) NS方向 (b) EW方向

図6 1階床部のフーリエスペクトル

す。測定は、日常の昼間に実施したため、測定データには周辺を通行する電車や車両によって生じる振動などが含まれている。本検討では、それらのノイズの少ない時間帯を選択して分析を行う。

3 常時微動測定結果

3.1 地盤の振動特性

地盤の測定記録のH/Vスペクトルを図3に示す。図(a)はNS方向、図(b)はEW方向を示している(以下、図3~6で共通)。

図3によると地盤の各方向の振動特性について、以下のことがわかる。

a) NS 方向

建物の東端部での卓越周期は0.52秒であるが、それから10m離れた位置では0.74秒付近にもやや卓越した振動が認められる。この周期が1/4波長則によって算定した地盤周期とほぼ一致する。これら東端部の2点では、基盤までの深さがあまり変わらないにもかかわらず、それらの周期特性や増幅率などが異なる傾向を示す。これには、傾斜基盤の影響や建物の基礎部の影響が考えられる。また、基盤の傾斜部の中間付近となる建物の中央部では、卓越周期が0.40秒付近であるが、明らかなピークが見られなかった。基盤深さが浅い西端部では、EW方向にはあまり顕著にみられていないが、0.2秒以下の短周期成分が優勢であった。

b) EW 方向

EW方向では、東端部では0.5~0.8秒付近にやや優勢な周期成分が見られるが、NS方向に比べてあまり明瞭では

なく、東端部から10m離れた地盤上での卓越周期は0.6秒であった。このように、NS方向とも異なる周期特性を示した。

3.2 基礎部の振動特性

基礎部のフーリエスペクトルを図4に示す。基礎部の卓越周期は、NS方向が0.30秒であり、EW方向では0.35秒である。これらは、地盤の卓越周期に比べて短い。これらには杭や基礎部の剛性などの影響であると考えられる。また、地盤の傾向と同様に、基礎部のNS方向の振幅は中央部から東端部へと層厚に応じて順に増幅する傾向を示す。一方、EW方向も西端部に比べて増幅する傾向があるが、中央部と東端部の振幅差が少なく、それらがほぼ同じ程度の振動レベルとなっている。

図5に地盤に対する基礎部のフーリエスペクトル比を示す。これより、地盤に対して基礎部は入力損失があり約0.3秒より短周期では著しく低下している。

3.3 1階床(免震層)の振動特性

1階床部のフーリエスペクトルを図6に示す。1階の床部の1次卓越周期は、NS方向では約0.80秒、EW方向では0.77秒であった。また、両方向にそれよりも短い0.50秒付近に卓越周期がある。さらに、NS方向には0.14秒や0.17秒に卓越周期がみられるが、EW方向には見られない。ここで、各卓越周期の周期帯でバンドパスフィルター処理して、NS方向の動きを1/4周期ごとにプロットして図7に示す。図の左側から周期が0.8秒、0.46秒および0.14秒を示している。図7(a)より、上部構造の1次周期は、

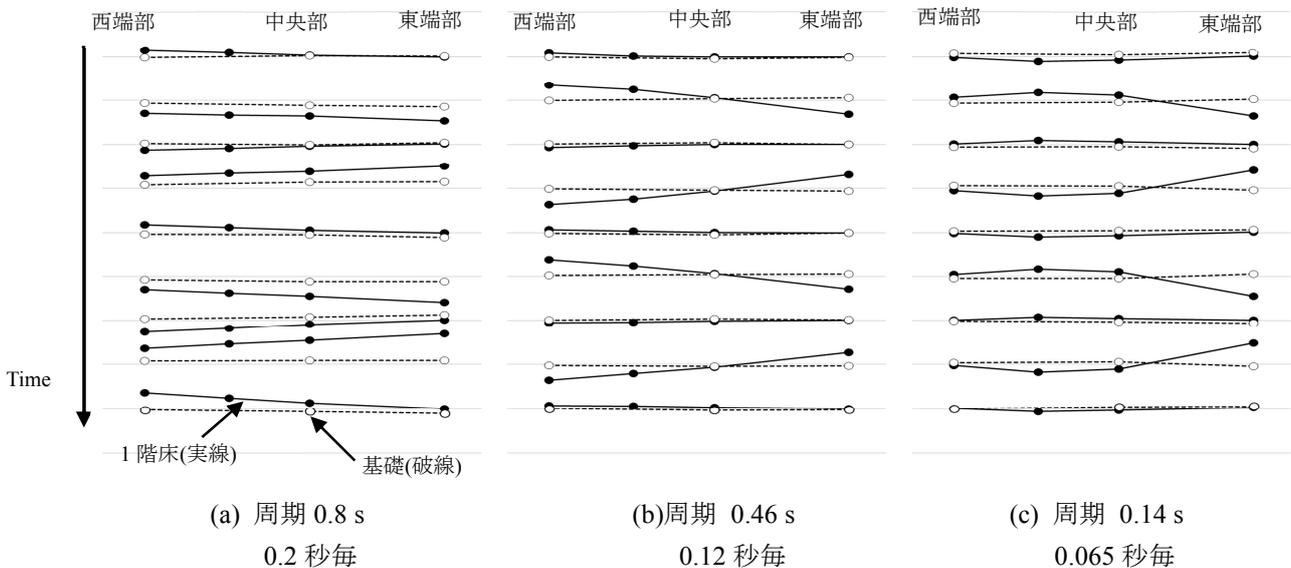


図7 周期毎の振動モード

ややねじれを含んだ並進方向の挙動になっている。図7(b)より上部構造の2次周期は、建物の中央部を中心としたねじれ振動であり、さらに、図7(c)で示すように短周期成分では西端部を固定端とした弓なりの振動モードと細長い建物特有の振動モードが生じていた。

4. 免震層の周期と初期剛性

1階床部で観測した加速度波による加速度応答スペクトルから算定した卓越周期と基礎部の加速度の関係を図8に示す。図より、1階床部の卓越周期は、加速度が10 cm/s²程度までは0.8秒から1.0秒付近であるが、10cm/s²を越えると免震層の非線形性が顕著となり長周期化していることがわかる。また、最大加速度を示した東北地方太平洋沖地震時では、卓越周期が約1.6秒となる。この時、観測波の加速度値を積分して算定した免震層の中央部の最大相対変位が約32.4mmであり、せん断歪10%時のせん断変形時の有効歪等を考慮すると設計時の固有周期と概ね設計値と一致する。逆に、基礎部の加速度が小さくなる場合の卓越周期と常時微動測定による周期を考慮すると概ね0.8秒に収束する。このことから、免震層の微小変形時(設計式で示されないせん断歪0.1%以下)のせん断剛性は、せん断歪10%時剛性の約4倍となることから推定できる。

5. まとめ

傾斜基盤上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建設された免震建物を対象に、常時微動測定結果および1階床部、基礎部で観測された強震記録から本建物の基本的な振動特性の分析を行った。

その結果、地盤では層厚に応じて振幅が増幅する傾向を確認した。増幅率は、NS方向およびEW方向でも観測されたが、NS方向とEW方向ではそれらの傾向に違いが見られた。また、地盤に対して短周期成分は低減する傾向があった。1階床部では、ねじれを含んだ振動モードがあり、特に短周期成分では細長い平面形状の特異な振動モードとなることが確認できた。さらに、強震記録から常時微動による免震建物の卓越周期はある周期に収束し、免震層の初期剛性を推定することができた。

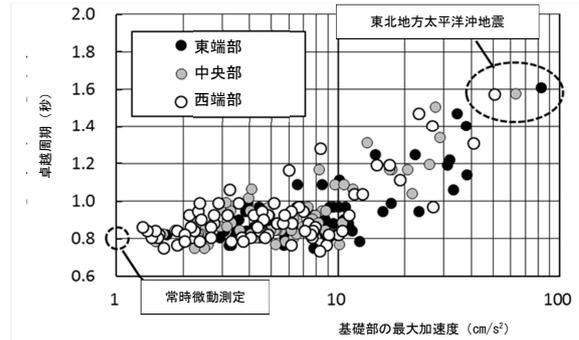


図8 観測記録の最大加速度と1階床の卓越周期

[謝辞]

本研究に際し、御指導いただいた東京理科大学の北村春幸教授、永野正行教授、鈴木賢人助教、松田頼征助教、九州大学佐藤利昭准教授、また測定に協力していただいた永野研究室の学生諸氏に謝意を表します。

[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、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、2017.6.
- 2) 宮原直樹、永野正行、北村春幸、佐藤利昭、鈴木賢人、飛田喜則：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1 観測記録に基づく建物の挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造II、pp.587-588、2016.8
- 3) 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、2016.8