

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4 入力地震動の時間差と振幅差に関する考察

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

— Part4 Study on lag time of arriving and amplitude ratio in torsional response by inclined bedrock —

飛田 喜則*¹ 山内 豊英*¹ 橋本 拓*² 関 敏宏*²

要 旨

支持基盤が傾斜しているため直接基礎と長さが異なる杭の異種基礎によって支持され、さらに比較的長大である免震建物において地震観測を実施している。観測記録によると、表層地盤の増幅率の違いによる振幅差が生じ、また、表層地盤が浅い部分と深い部分では層厚に応じて基盤から地震波が伝播するために時間差が生じる傾向がみられた。これにより基礎部には捩れ振動が生じるが、免震層を介して上部構造の捩れ振動が緩和されていた。

キーワード：免震建物／傾斜基盤／地震観測／捩れ振動

1. はじめに

一般に、基礎構造の設計において支持基盤までの深さが様でない場合、2種類以上の異なる基礎形式で支持することが多い。その場合、それらの層厚の違いによって各部での地盤増幅率が異なることなどから基礎部にねじれ振動が生じることが懸念される。これらに対する多くの設計法や解析による検討がなされているが、実際の地震の記録によってその影響を検討した例は少ない。これまで、支持基盤が傾斜しているため直接基礎と長さが

異なる杭の異種基礎によって支持され、さらに平面計画が比較的長大である免震建物で地震観測を実施し、その地震記録を基にして、傾斜基盤にある地盤・基礎部の地震動特性および建物の挙動について検討してきた^{1)~6)}。

本報告は、2005年7月23日に千葉県北西部で発生した地震(M:6.0)を対象として、基礎部のねじれ振動、特に層厚の違いによって生じる時間差と振幅差について検討した結果を示す。

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	A棟:1324.9m ²	B棟:958.6m ²	
基準階面積	A棟:961.9m ²	B棟:692.6m ²	
階 数	地上6階 塔屋1階		
軒 高	17.55m		
基礎底深さ	A棟:3.15～3.25m	B棟:3.40～3.50m	
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	直接基礎および場所打ちコンクリート杭の併用		

表-2 地盤概要とせん断波速度分布(東端部)

深さ (GL-m)	地層	湿潤密度 (kN/m ³)	N値	弾性波速度(m/sec)	
				Vs	Vp
0.00 ~ 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		50以上	730	1910

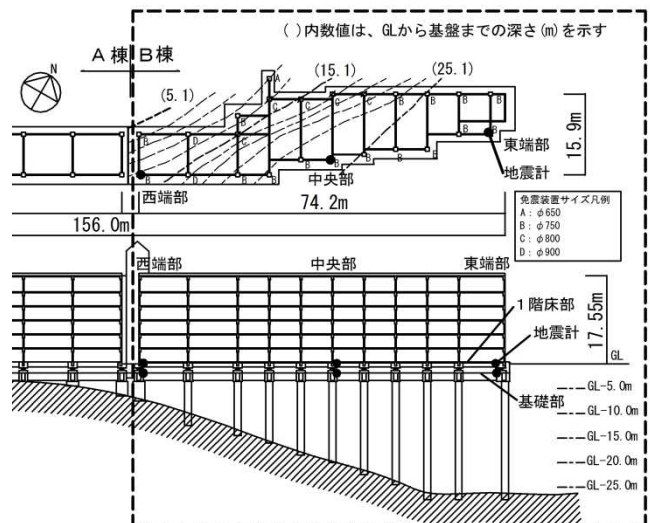


図-1 建物概要(基盤概要)

*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. 建物・地盤・地震観測概要

2.1 建物概要

対象建物の概要を表-1に示し、1階平面図、地盤(杭)の断面概略図を図-1に示す。本建物は、鉄筋コンクリート造(長辺：ラーメン構造、短辺：耐震壁付きラーメン構造)の集合住宅である。検討対象は、地震観測を実施しているB棟である。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。免震装置は、直径が650mm～900mmの高減衰積層ゴム(24基)である。せん断歪が10%時の設計時の固有周期は約1.706秒である。

2.2 地盤概要

地盤調査による地盤の概要を表-2に示す。本地盤は、敷地内で東西に傾斜(最大傾斜角30度)しており、表層部および支持層のせん断波速度は、それぞれ140m/sec、730m/secのほぼ2層構造である。なお、常時微動測定による東端部の卓越周期は約0.70秒であった。

2.3 基礎構造概要

基礎形式は、西端部の北側では直接基礎(ラップルコンクリート)、それ以外は支持層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。基礎底はGL-3.5mである。支持層の深さおよび杭長の概略を図-1に示す。

2.4 地震観測概要

地震計の設置位置を図-1に●印で示す。地震計は、建物の西端部、中央部および東端部の3箇所、それぞれ

基礎底版部(以下、基礎部と称す)と上部構造の1階梁部(以下、1階床部と称す)である。観測方向は、中央部では長辺方向(EW)、短辺方向(NS)および上下方向(UD)の3成分とし、西端部と東端部は短辺方向(NS)の1成分である。サンプリング周波数は100Hzである。本報では短辺方向(NS)を検討対象とする。

3. 観測地震

3.1 加速度時刻歴

本建物では2000年4月から2012年4月までに98個の地震を観測している。それらの中で、比較的大きな加速度振幅を示した2005年7月23日に千葉県北西部で発生した地震(M6.0)によって観測した加速度波形(NS方向)およびそれらの擬似速度応答スペクトルを図-2に示す。図-2(a)は1階床部、図-2(b)は基礎部を示す。

図-2(b)の基礎部の加速度波形から、30～33秒付近(S波初動部と称す)では西端部で比較的小周期成分が多いパルスのような加速度波形を示しているが、34秒付近からその振幅が小さくなっている。しかし、34秒以降(後続部と称す)では、西端部に比べて中央部そして東端部へ次第に振幅が大きくなり、かつ周期がやや長い振動が見られる。東端部のその振動は、時間経過とともに振幅が小さくなっているものの比較的小周期成分が多い時間継続している。擬似速度応答スペクトルより、基礎部では西端部から東端

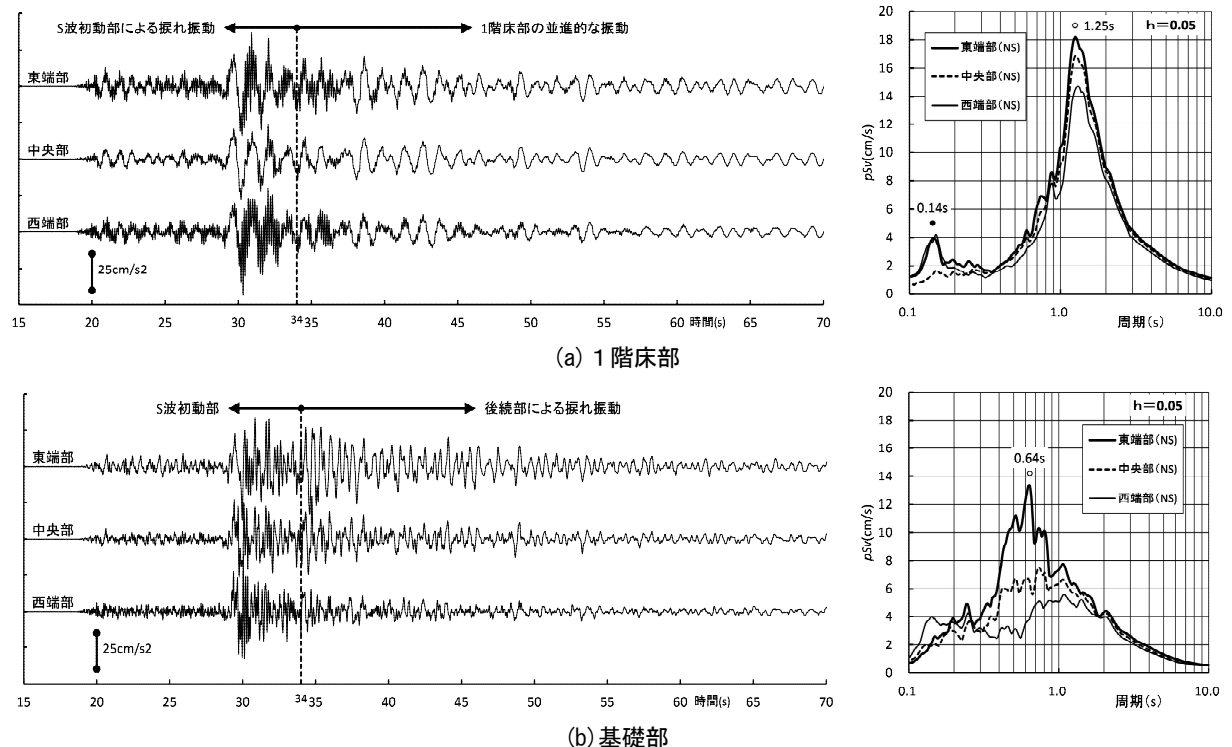


図-2 2005年7月23日千葉県北西部地震による観測記録と擬似速度応答スペクトルの例(NS方向)

部にかけて 0.5～0.8 秒付近が増幅しており、特に東端部で増幅が大きい。東端部の卓越周期は 0.64 秒であり、この周期は常時微動測定による地盤の周期よりやや短い。ほぼ一致している。よって、この周期成分が東端部の地盤の影響によって増幅することで各観測点での大きな振幅差を生じさせている。しかし、中央部では、東端部ほど地盤深さに応じた周期成分の増加がみられない。

図-2(a)の1階床部では、免震効果によって基礎部よりも長周期の振動となっている。S波初動部付近では、西端部の基礎部に入力された短周期の振動があり、これは擬似速度応答スペクトルにおいて 0.14 秒付近には両端部のみが卓越している振れ成分として観測されている。しかし、その後の後続部では、1階床部の全観測点ではほぼ同じ程度の振幅であり、基礎部に比べて振れ振動の少ない並進的な挙動をしている。これは擬似速度応答スペクトルによると、1階床部の卓越周期が約 1.25 秒であり、その周期の成分が西端部から東端部へやや増幅しているものの、基礎部に比べてその割合が小さい。このように、本建物の観測波には、基礎部では基盤の深さに応じて振幅が大きくなり、その振幅差によって振れ振動を生じるが、免震層を介することで上部構造が並進的な挙動となる。

3.2 基盤深さによる時間差

本建物の基礎部の各観測点の記録には、西端部に対して中央部および東端部の最大値を示す点には時間的なずれ（以後、時間差と称す）が見られる。例えば、図-2で示した地震について、東端部の卓越周期を含む 1.2～2.5Hz のバンドパスフィルター処理を施した加速度波形（33 秒～40 秒）を図-3に示す。この時間帯において、周期ごとの最大値を図中に○にて示している。ここから西端部に対する時間差を求めると、その平均時間差は、中央部では 0.08 秒、東端部では 0.15 秒である。このように各観測点で明確な時間差が生じており、他の地震波の時間差について同様の傾向が見られる。

この時間差は、基盤に達した地震動が、表層地盤内を伝播することによって生じると考えられ、東端部では地盤層厚に応じた時間差となる。しかし、図-1で示した基盤の深度分布では、中央部の深さは南側では東端部とほぼ同じ 22m 程度であるが、北側では 15m 程度と浅くなっている。中央部の時間差が東端部の半分程度と短くなっていることから、中央部では南北で基盤深度が大きく異なり、浅い層厚の影響を受けているものと考えられる。

3.3 振れ応答の割合

観測波の分析により、東端部では表層地盤の影響を受

け増幅率が異なることによる振幅差、および地震波が基盤から伝播による時間差によって基礎部の振れ振動が生じている。振れ振動の大きさについて、基礎部の中央部の変位または 1 階床部では基礎部に対する相対変位を基準変位とし、それらに対する振れによって生じる西端部または東端部の増分変位との比を振れ応答率として算定する。対象地震による基礎部および 1 階床部の振れ応答率は、基礎部では 0.6 と大きい値を示すが、1 階床部では 0.3 程度となる。このように基礎部に比べて 1 階床部では振れ応答率が半減しており、基礎部の振れ振動が免震層を介することで小さくなる傾向がある。

4. 1 階床部の加速度振幅と周期特性

4.1 加速度比

これまで観測した基礎部の最大加速度と 1 階床部の最大加速度を基礎部で除した加速度比との関係を図-4に示す。これより、観測された基礎部の最大加速度値は 10cm/s^2 以下が多く、それらの多くは加速度比が 1.0 を超えている。しかし 10cm/s^2 を超えると加速度比は 1.0 を下回るものが多くなり免震効果が発揮されている。

4.2 周期特性

1 階床部で観測した加速度波の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-5に示す。図より、1 階床部の卓越周期は、加速度が 10cm/s^2 程度までは 0.8 秒から 1.0 秒付近であるが、 10cm/s^2 を超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。これは図-4において、 10cm/s^2 以上で 1 階床部の応答が低減した傾向に一致している。

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（上部構造の絶対変位－基礎部の絶対変位）が約 32.4mm（免震装置のせん断歪 20%）であり、せん断変形時の有効歪等を考慮する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と卓越周期が約 0.8 秒に収束することから、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 倍となることが推定できる。

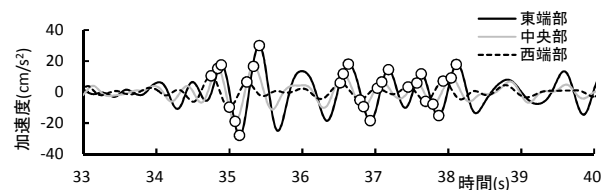


図-3 加速度波形にみる時間差

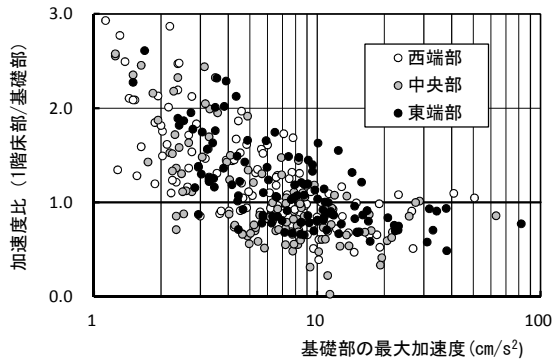


図-4 基礎部の最大加速度と加速度比

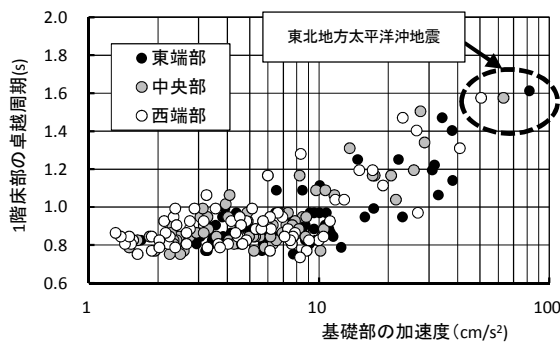


図-5 最大加速度と1階床部の周期

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、また、対象地震による1階床部、基礎部のそれぞれ3点で観測された強震記録から、振れ応答の分析を行った。

基礎部の各点の観測波には、それぞれの表層地盤の層厚に応じた増幅率の違いによる振幅差と、基盤に達した地震動が表層地盤内を鉛直方向に伝播することによる時間差を生じることによって基礎部には振れが生じる。しかし、免震層を介することで1階床部の振れ振動が緩和され、基礎部に比べて半減する傾向が見られた。

[謝 辞]

本検討では、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、松田頼征助教および九州大学佐藤利昭准教授に多大なるご助言とご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 高森剛，大場新太郎，飛田喜則：長さの異なる杭基礎で支持された免震建物の地震応答性状，日本建築学会大会学術梗概集，構造Ⅱ，pp. 687-688，2001. 7
- 2) 奥野友香，大場新太郎，飛田喜則：支持条件の異なる基礎を有する免震建物の地震応答性状，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅱ，pp. 297-298，2004. 7
- 3) 飛田喜則，菊地克典：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，浅沼組技術研究所報，No. 18，pp. 13-20，2006. 11.
- 4) 山内豊英，飛田喜則，菊地克典：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2 2000年から2012年までの地震観測データによる検討，浅沼組技術研究所報，No. 24，pp. 3-1~3-8，2012. 12.
- 5) 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
- 6) 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