

3. 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3 東北太平洋沖地震時の地震観測データ、杭に生じる応力の検討

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

— Part3 Study on the Measurement Data of the 2011 Tohoku Earthquake —

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、2011年東北地方太平洋沖地震時に本建物で観測した長周期地震動を対象として検討した結果である。地震観測に基づいた検討、2次元 FEM モデルによる地盤応答解析による観測波のシミュレーション、さらに3次元フレームによる地震応答解析等をおこない地震動特性および杭に生じる応力状態を検討した。本解析によって観測波を概ね再現できること、それにより杭に生じる応力状態を把握することができた。

キーワード：免震建物／傾斜基盤／地震観測／捩れ応答

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震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その建物の挙動について検討してきた¹⁾²⁾。本報告は、2011年東北地方太平洋沖地震時に本建物で観測した長周期地震動を対象とし、地震特性の検討、2次元 FEM 解析および3次元立体フレームモデルを用いて地震応答解析を行った結果について述べる。

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

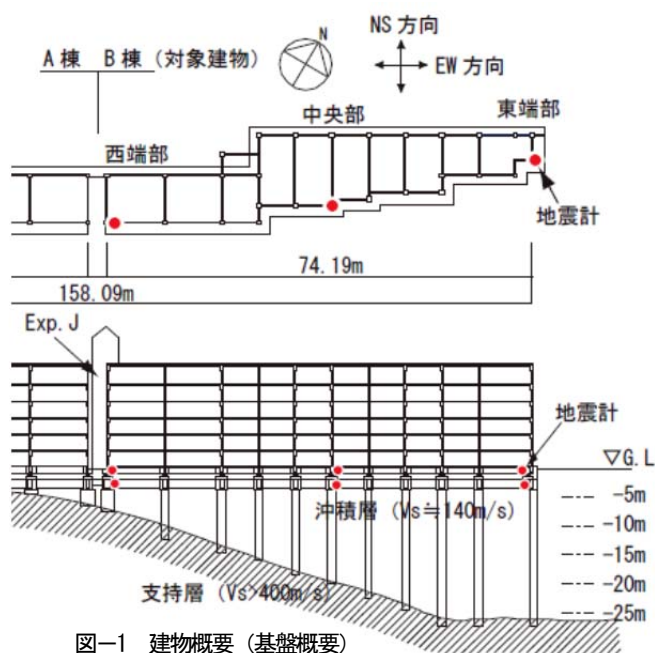


図-1 建物概要(基礎概要)

*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。微小変形時($\gamma=10\%$)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、上部構造と称す)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。ただし、本報では上下方向(UD)は検討対象としない。

3. 観測地震

3.1 加速度時刻歴

観測した加速度波形を図-2および図-3に示す。図-2(a)は基礎部の中央のEW方向、図-2(b)は基礎部の各観測点のNS方向である。同様に、図-3は同様に上部構造の加速度波形である。

基礎部の観測波は、長周期地震特有のなだらかな包絡形状を示し、継続時間の長い地震である。NS方向の加速度波形(図-2(b))では、今までの観測波と同様に¹²⁾に、全体的に地盤深さに応じて西端部<中央部<東端部の順で最大加速度値が大きくなっており、基礎部にねじれ震動が生じている。しかし、上部構造の加速度波形(図-3(b))では、西端部、中央部および東端

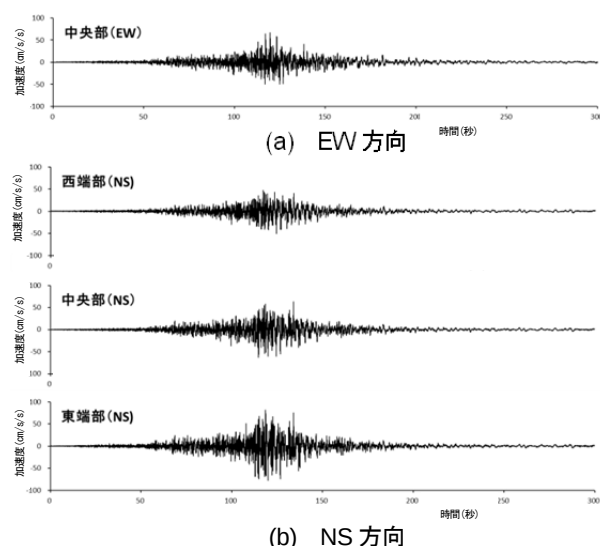


図-2 基礎部の加速度波形

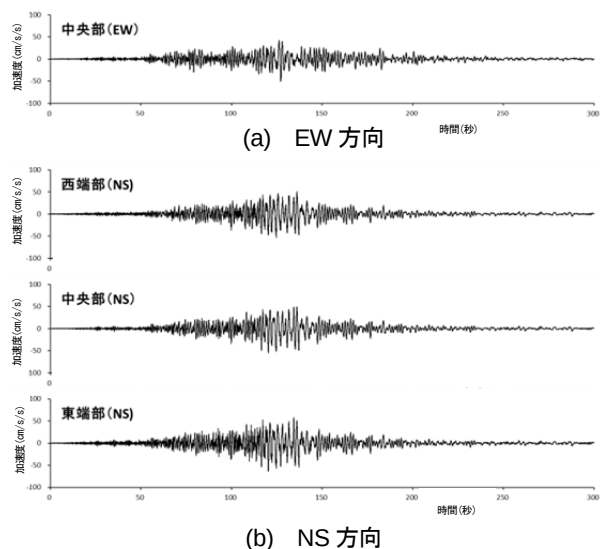


図-3 上部構造の加速度波形

部において、基礎部に比べて大きな加速度の違いが見られず、免震層を介することで基礎部のねじれ震動が緩和されている。この傾向は、今回の長周期地震動に限らず、短周期成分を多く有する他の観測記録等でも同様である。

また、図-4に基礎部の各加速度波形に地盤の卓越周期を含む1.25～2.5Hzのバンドパスフィルター処理を施し、最大値付近の112秒～124秒間を重ね書きして示す。これより、西端部(黒線)に比べて、中央部(青線)および東端部(赤線)では時間的なずれが見られ、最大値

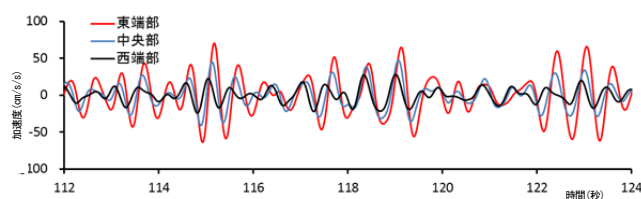


図-4 基礎部の加速度波形(バンドパス処理)

を示した 115 秒付近での時間差は、中央部と西端部では 0.09 秒、東端部と西端部では 0.13 秒である。これらは各点の下部の基盤からの伝播した震動による層厚に応じた時間的なずれであると考えられる。傾斜基盤を有する地盤では、振幅の増幅以外に、層内を伝播することによる時間的なずれが生じている。

3.2 速度応答スペクトル

基礎部の速度応答スペクトルを図-5 に示す。直接基礎である西端部を基盤と見なし、西端部に対する中央部、東端部の速度応答スペクトル比を図-6 に示す。図-5 によると、基礎部の卓越周期は約 0.65 秒と約 2.10 秒である。図-5 および図-6 より、約 2.10 秒の周期の成分は、各観測点で振幅がほぼ一致し増幅傾向が見られないことから、基礎部が一体となった併進的な挙動を示しており、遠距離（長周期）地震に特有のものである。次に、周期 0.65 秒付近の成分は、杭長が長くなる東端部に行くに従い増幅している。特に東端部の応答は、その増幅率が大きく、その周期が地盤周期の 0.70 秒とほぼ一致することから、傾斜地盤の最も深い地盤深さの影響を受けているものと考えられる。この傾向は、他地震でも同様である。

基礎部に対する上部構造のスペクトル比を図-7 に示す。これより、免震建物の卓越周期は 1.7 秒である。観測波を積分して算定した免震層の最大相対変位（図-14 参照）が約 4cm（免震層のせん断歪 25%相当）であり、観測による周期は、概ね設計時の固有周期と一致する。

4. 地盤解析

当該基盤の 2 次元 FEM 解析モデルを用いて、観測波における一次元モデルとの固有周期の変化、伝達関数等から傾斜基盤の動特性について考察した結果、さらに観測波を元にして地盤の各点での地震動を推定する方法を示す。

4.1 解析モデル概要

対象建物の基盤深度の等深度図を図-8 の左図に示す。本地盤はやや複雑な深度分布を有しているものの、約 60 度回転させた場合、基盤と表層地盤からなる 2 次元地盤（同図左上）と見なすことができる。本地盤を 2 次元の FEM 解析モデルとしてメッシュ分割し、周波数応答解析で計算をおこなう。FEM 領域は水平 27.6m、鉛直 54.4m とし、メッシュ間隔は 10Hz の S 波が十分透過できるように設定する。解析モデルの左右境界はエネルギー伝達境界、底面は粘性境界とし、左右の遠方領域は、エネルギー伝達境界により薄層法の考え方を利用して地

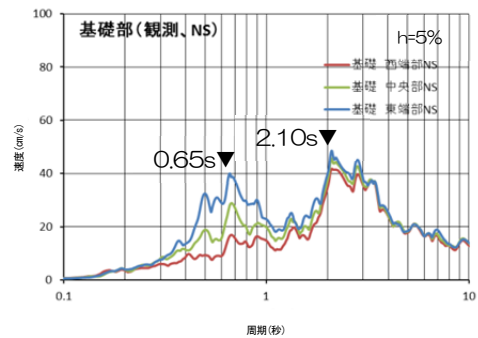


図-5 速度応答スペクトル(基礎部、NS 方向)

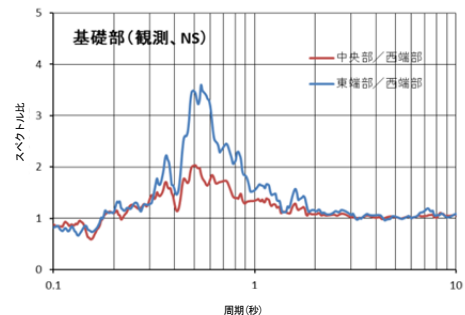


図-6 西端部に対するスペクトル比（基礎部、NS 方向）

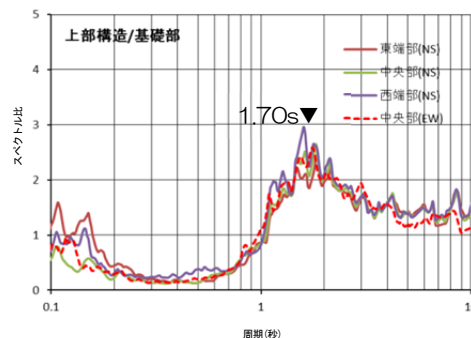


図-7 基礎部に対する上部構造のスペクトル比

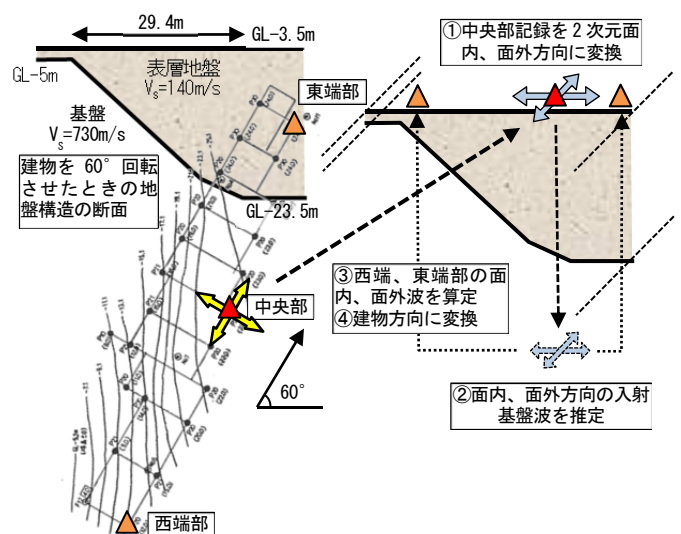


図-8 2次元傾斜地盤モデルと中央部記録から東西端部応答の推定

震応答を評価する。図-8 で示す方法によって観測波から各点の地震波を推定する。地盤構造は簡単に2層とし、表層地盤と基盤のS波速度をそれぞれ140m/s、730m/sとする。

4.2 2次元地盤応答と伝達関数

FEM地盤の下部よりSH波とSV波の鉛直入射をおこなう。入射波振幅 $2E_0$ に対する観測点3地点の伝達関数を図-9に示す。同図には各地点の直下地盤を水平成層構造と仮定したときの伝達関数を破線で示している。これより、以下の傾向が見られる。

- ①観測記録と同様に表層地盤の深い順に増幅倍率が大きくなる。
- ②中央部と東端部の基盤深度が大きく変わらないが、増幅倍率の差が大きくなっている。これから、中央部では基盤形状等による影響を受けているものと推測できる。
- ③鉛直SH波の増幅割合に比べてSV波入射時でのそれは小さく、入射波による増幅特性の違いが見られる。
- ④水平成層構造と仮定したときの増幅割合に比べて、傾斜基盤を有する地盤のそれは小さくなっている。

4.3 観測記録のシミュレーション解析

観測波の3成分が得られている中央部での観測記録、また入射SH波、SV波と東西端部での伝達関数より、各地点での面内波、面外波を算定する。なお、基礎下位

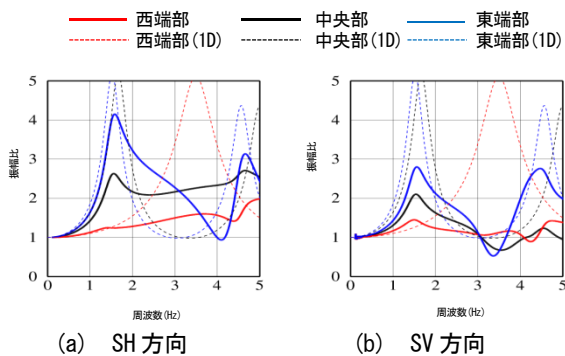


図-9 2次元FEM解析から得られた各地点の伝達関数

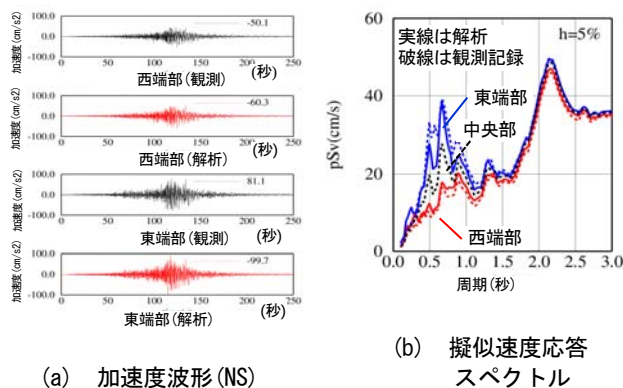


図-10 東西端部の再現波形とスペクトル(NS方向)

置での記録には建物や杭の影響はないものとする。

中央部での強震記録から推定した東西端部東西端部のNS方向の地盤応答を、観測記録と比較して図-10(a)に示す。また、地震動の擬似速度応答スペクトルを図-10(b)に示す。これより、最大加速度がやや過大評価となるものの、3地点での地震動特性の違いが概ね良好に再現される。また、観測波スペクトル特性は概ね良好に再現されていることが確認できる。

なお、本手法により、観測点がない基礎部のEW方向や、地盤内の任意の点についても波形を推定することができる。

5. 地震応答解析

5.1 立体モデルによる地震応答解析

2次元FEM解析モデルにより算定した基盤波、地盤の応答波形を用いて、周辺地盤一杭・基礎一上部構造の立体フレームモデルによる多点入力、NS方向およびEW方向の同時加振による地震応答解析を行い、建物応答および地震時に杭に生じる応力について考察する。

5.2 立体フレームモデル

解析モデル概要図を図-11に、諸条件を以下に示す。

- ①解析モデルは、周辺地盤、杭、基礎部、免震装置および上部構造で構成する3次元立体フレームモデルである。
- ②杭・柱・壁はコンクリートおよび鉄筋を考慮したファイバーモデル、梁は線材モデルに置換してモデル化する。いずれも非線形性を考慮する。
- ③杭と周辺地盤はFrancis式³⁾により算定した非線形バネ、減衰要素であるダッシュポットにて連結する。
- ④地震動は、FEMモデルにて算定された基盤入力波、および各周辺地盤節点に、基盤入力波からの相対速度・変位を入力する。
- ⑤免震装置は8本のバネからなるマルチスプリングモデルとする。復元力特性は、メーカーでの設計式を参考と

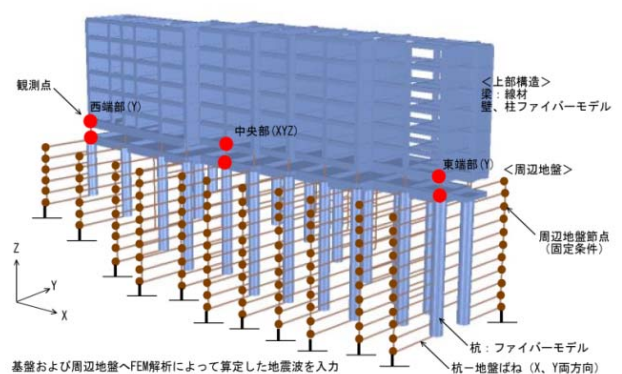


図-11 3次元立体骨組みモデル概要

する。なお、免震装置の粘性減衰定数は応答の再現性を目的としているため0.02とする。

5.3 固有値解析結果

本建物の1次～4次の固有値解析結果を表-3に、また、1次および4次のモード図を図-12に示す。なお、固有値解析でのモデルは、周辺地盤は質量を有し、各質点をせん断バネで連結した地盤の影響も考慮している(図では地盤は省略)。また、免震装置の剛性は、そのせん断歪が10%時の値とする。

固有値解析結果より、1次～3次までは上部構造(免震建物)のX、Y方向の水平(1.64秒)、ねじれ(1.55秒)の振動モードである。4次では、東端部の深い地盤とその辺りの杭基礎が一体となってNS方向に挙動するモードが表れる。図は省略しているが、0.60秒には地盤-杭がEW方向に変形するモードとなっている。このように、地盤-杭を含んだ振動モードから、本建物の杭、基礎部および上部建物での複雑な挙動を確認できた。

表-3 固有周期 (1次～4次)

	1次	2次	3次	4次
周期(s)	1.625	1.625	1.556	0.690
状態	免震 X方向	免震 Y方向	免震 ねじれ	東端部 杭

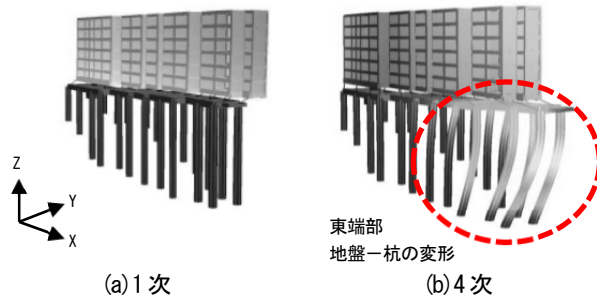


図-12 固有値解析結果

5.4 基礎部の応答波形

解析した基礎部の加速度波形と観測波との比較を図-13に、免震層の相対変位の比較を図-14に示す。観測波を黒線(左図)で、解析波を赤線(右図)で示している。図-13により、基礎部の解析波は、観測波とほぼ一致しており、観測波と同様に東端部ほど大きな加速度となる傾向を示している。

図-14より、免震層の相対変位波形には、解析波にやや短周期の応答が見られるが、ほぼ観測波を表現することができた。

5.5 杭応力

地震応答解析によって杭に生じた最大曲げモーメントを図-15に示す。図-15(a)はEW方向変形に伴うY軸回り、図-15(b)はNS方向変形に伴うX軸回りの最大曲げモーメントを示している。これより、NS方向、EW方向変形時ともに、建物中央付近(X22からX25)の杭長が短い部分において杭頭の曲げモーメントが大きくなり、水平力の負担割合が多くなっている。また、杭長が長い杭では、比較的、杭中央付近は地盤変形に応じて曲げモーメントが大きくなっている。本図は最大値を示しているが、同時刻の曲げモーメント分布でも、杭長や地盤の変形に応じて杭に生じるモーメント分布の方向が一定せず複雑な分布となることも確認できた。

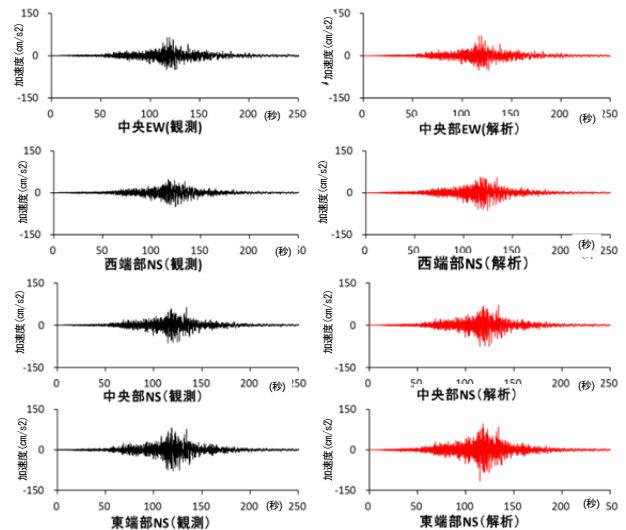


図-13 基礎部の加速度波形(観測波と解析)の比較

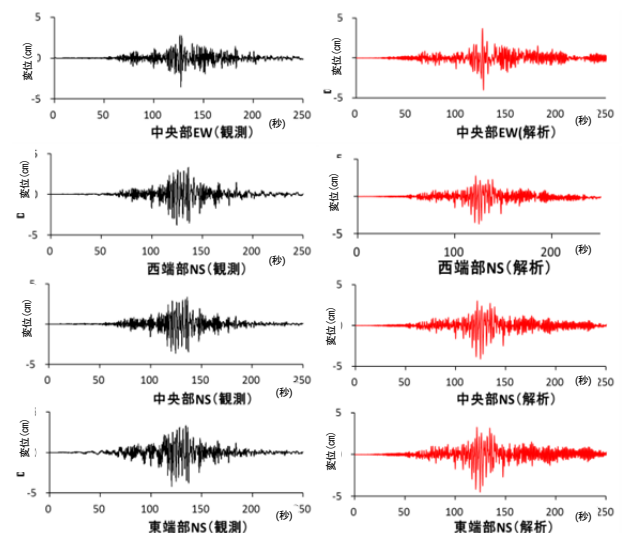
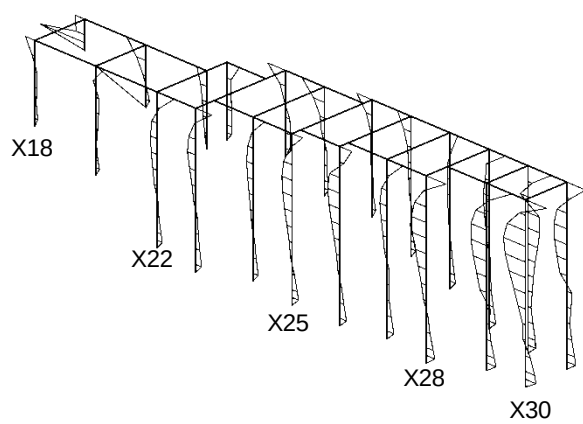
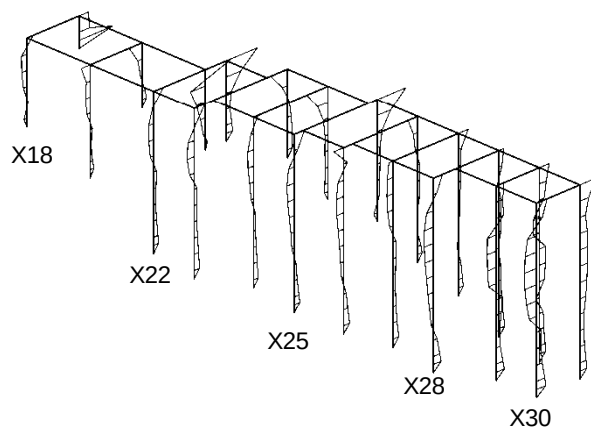


図-14 免震層の相対変位波形(観測と解析)の比較



(a)EW 方向変形に伴う曲げモーメント分布



(b)NS 方向変形に伴う曲げモーメント分布

図-15 杭に生じる最大曲げモーメント分布

6. まとめ

本検討により、傾斜基盤を有する免震建物の観測波では、層厚に応じて振幅が増大し、その震動には層内を伝播するために時間差が生じることが明らかとなった。また、周辺地盤の地震波を2次元FEM解析により推定し、それらを用いて多点入力、NS方向およびEW方向の同時加振による3次元立体骨組地震応答解析により基礎部や免震建物の観測記録との整合性を確認して、その特徴を再現することができた。さらに、杭基礎に作用する応力を推定することも可能となった。

今後、この結果を元に、傾斜地盤に建つ免震建造物のより詳細な検討をおこない、傾斜基盤を有する免震建物の応答の特性の検討、さらに杭の設計のための基礎資料とする予定である。

【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、鈴木賢人助教授、松田頼征助教授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)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.
- 2)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.
- 3)日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計 pp.159-161 2001