

### 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2 2000年から2012年までの地震観測データによる検討—

#### Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

#### — Part2 Examination about the Measurement Data of the Earthquake from 2000 through 2012 —

山内 豊英\*<sup>1</sup> 飛田 喜則\*<sup>2</sup> 菊地 克典\*<sup>3</sup>

#### 要 旨

当社が設計および施工を行った長さが異なる杭を有する免震建物について、2000年から2012年までの地震観測結果を整理した。その結果、基礎部の最大加速度は、建物西端部に位置する直接基礎部と比較して、東端部の杭長の長い杭基礎部の方が大きくなる傾向があり、震央距離が大きくなるほど、その比率も増大する傾向が見られた。さらに、入力地震動がある程度大きい場合に、免震装置による上部構造の応答低減効果が確認された。東北地方太平洋沖地震の観測結果では、建物の西端部と東端部で基礎部への入力地震動に位相差が確認されたが、その位相差が上部構造の振動特性に与える影響は比較的少なく、上部構造は概ね並進振動していたことが確認された。

キーワード：免震構造／併用基礎／地震観測

#### 1. はじめに

当社が設計および施工を行った神奈川県逗子市に建つ基礎免震構造の某集合住宅では、地盤内の支持層が傾斜していることから、直接基礎と杭長の異なる杭基礎で構成された併用基礎を採用している。

このような基礎形式の場合、地震時における地表面（免震層直下）の応答が様にならず、建物の上部構造に入力される地震波に振幅差や位相差が生じ、捩れ振動が励起されることが指摘されている<sup>1)</sup>。また、当該建物は、長辺方向の長さが約156mもあることから、地震波の入力差による影響がより大きくなることが考えられる。

そこで、併用基礎を採用した免震建築物の地震時挙動に関する知見を得るため、当該建物の基礎部と1階梁部に地震計を設置し、これまで地震観測を行ってきた。既報<sup>2)</sup>においては、2000年～2005年までの地震観測結果について報告を行っており、表層地盤の層厚に応じて基礎部における地震波の周期特性が異なること、並びに、下部構造の捩れ振動が上部構造に及ぼす影響が比較的小さいこと等を示した。

2005年以降、多くの観測データが蓄積されており、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震での地震時挙動も得られた。

本報告は、基礎底盤および上部構造での地震記録に基づき、入力地震動や建物応答の特徴を検討した結果について示すものである。

#### 2. 対象建物と観測概要

##### 2.1 建物概要

対象建物の1階平面図、断面図、地盤（杭）構成図を図-1に示し、対象建物の概要を表-1に示す。本建物は、鉄筋コンクリート造（6階建て、軒高さが17.55m）の集合住宅であり、基礎免震構造を採用している。

本建物の平面形状は、長辺方向（EW）が約156m、短辺方向（NS）が32.7mである。上部構造では長辺方向の中央部においてエキスパンションジョイントを設けており、A棟、B棟に分割されている。各棟の長辺方向の長さは、A棟が約78.4m、B棟が約74.2mである。

構造形式は、長辺方向がラーメン構造、短辺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ている。なお、図-1に示すように、地震観測はB棟のみで行っている。

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 <sup>2</sup>	B棟:958.6m <sup>2</sup>
基準階面積	A棟:961.9m <sup>2</sup>	B棟:692.6m <sup>2</sup>
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	

\*1 技術研究所構造研究グループ

\*2 大阪本店設計部構造グループ

\*3 東京本店設計部構造第2グループ

2.2 地盤概要

建物直下の地盤概要を表-2に示す。本建物の地盤は、土丹層を支持層とし、その上にシルト主体の沖積層が続き、最上層は土丹層塊主体の埋土層が覆っている。

シルト層は、せん断波速度 (Vs) が 140m/sec であり、ポアソン比は約 0.495 である。支持層である土丹層は、せん断波速度が 730m/sec であり、敷地内で東西に傾斜しているため、約 23.5m の高低差を有している。土丹層の最大傾斜角度は 30° 程度である。

常時微動測定の結果、シルト層が最深となる B 棟東側の卓越周期は約 0.70sec であった。

2.3 免震装置概要

免震装置には、低弾性高減衰積層ゴム (KL302) を採用している。表-3に免震装置の概要を示す。免震装置のゴム直径は、650mm~900mm であり、設置基数は、A 棟が 33 基、B 棟が 24 基である。また、免震装置の剛心と上部構造の重心が一致するように配置している。

地震計を設置している B 棟の免震層の水平剛性 (設計値) は、せん断ひずみが 10% の場合で 1229.4kN/m、100% の場合で 422.1 kN/m である。また、それぞれの一次固有周期は、1.66sec および 2.80sec である。

2.4 基礎構造概要

支持層は、N 値が 50 以上の土丹層であるが、前述のように、東西方向に傾斜している。したがって、基礎形式は、敷地中央部付近 (B 棟西端部) では直接基礎、それ以外を支持層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としている。

表-2 地盤概要

深さ (GL-m)	地層	湿潤密度 (kN/m <sup>3</sup> )	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	270	1560
23.70 ~ 25.10	砂混じり土丹塊	18.63	14		
25.10 ~ (31.18)	土丹		50以上	730	1910

表-3 免震装置概要

	HM065H6	HM070H6	HM075H6	HM080H6	HM090H6	
内部鋼板外径 D (mm)	650	700	750	800	900	
内部鋼板内径 Di (mm)	100	100	100	150	150	
ゴム厚 tR (mm) × 層数 n	6.0×27	6.0×27	6.0×27	8.0×20	8.0×20	
ゴム部層厚 h (mm)	162	162	162	160	160	
1次形状係数 S <sub>1</sub>	22.9	25.0	27.1	20.3	23.4	
2次形状係数 S <sub>2</sub>	4	4.3	4.6	5	5.6	
有効断面積 (mm <sup>2</sup> )	3240	3770	4339	4850	6185	
せん断弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) (せん断ひずみ10%時)	1.81					
水平剛性 Kh(N/mm) (せん断ひずみ10%時)	36.30	42.23	48.61	55.01	70.15	
フランジ外径 (mm)	950	1000	1100	1150	1250	
個数	A棟	6	8	—	12	7
	B棟	1	—	16	5	2

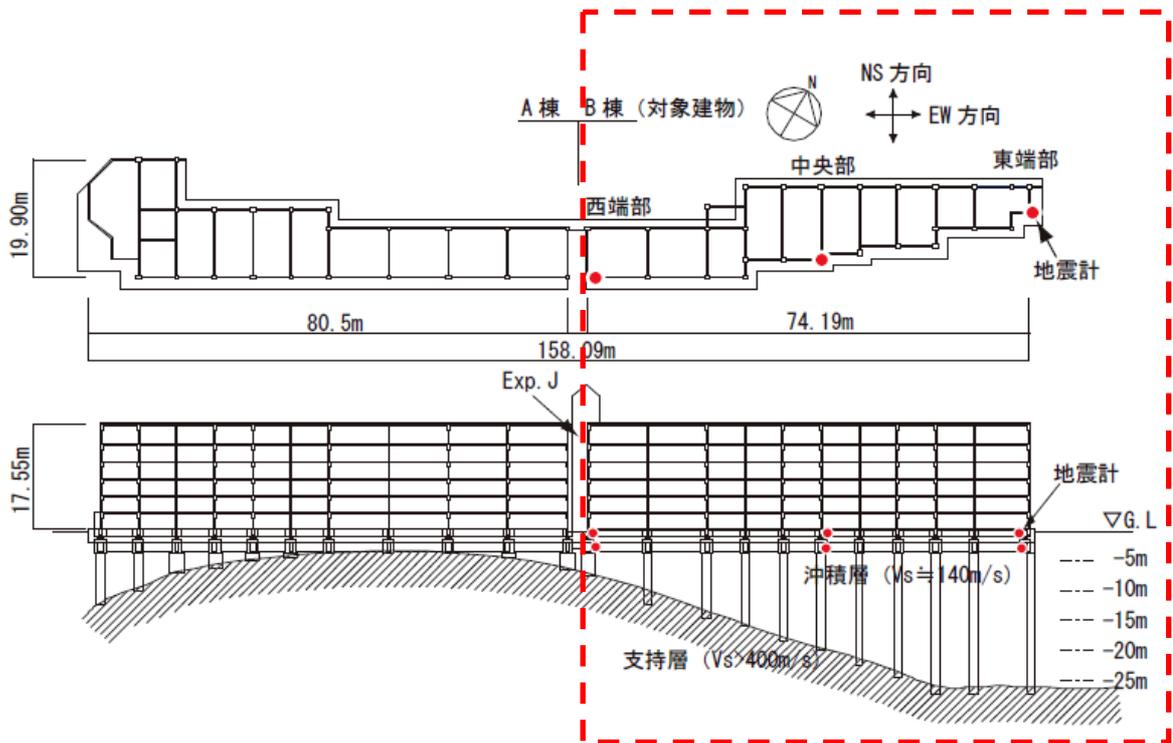


図-1 対象建物の平面図および断面図

## 2.5 地震計概要

地震計は、0.1Hz～30.0Hzの領域でほぼ平坦な感度特性を持つサーボ型の加速度型地震検出器である。地震計の設置位置を図-1に示す。

地震計は、B棟の西端部、中央部および東端部の3箇所それぞれにおいて、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階梁部と称す）に設置している。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成分としている。サンプリング周波数は100Hzである。

## 3. 観測地震概要

本建物においては、2000年4月から2012年4月までに98回の地震が観測されている。震源位置と建設地との関係を図-2に示す（一部の地震の震源は、図の範囲外にある）。また、最大加速度の上位20地震について、発生日時、震源地、マグニチュード等を整理した一覧表を表-4に示す。

観測された地震データの震源地は、千葉県付近など震央距離100km以内の地震が比較的多い。一方、最大加速度の上位20地震では、2011年以降の観測データが半数近くを占めている。観測最大加速度では、2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震が81.97galと最も大きかった（表中網掛け）。当該地震時の震度は4であり、建物や基礎に被害が生じることは無かった。

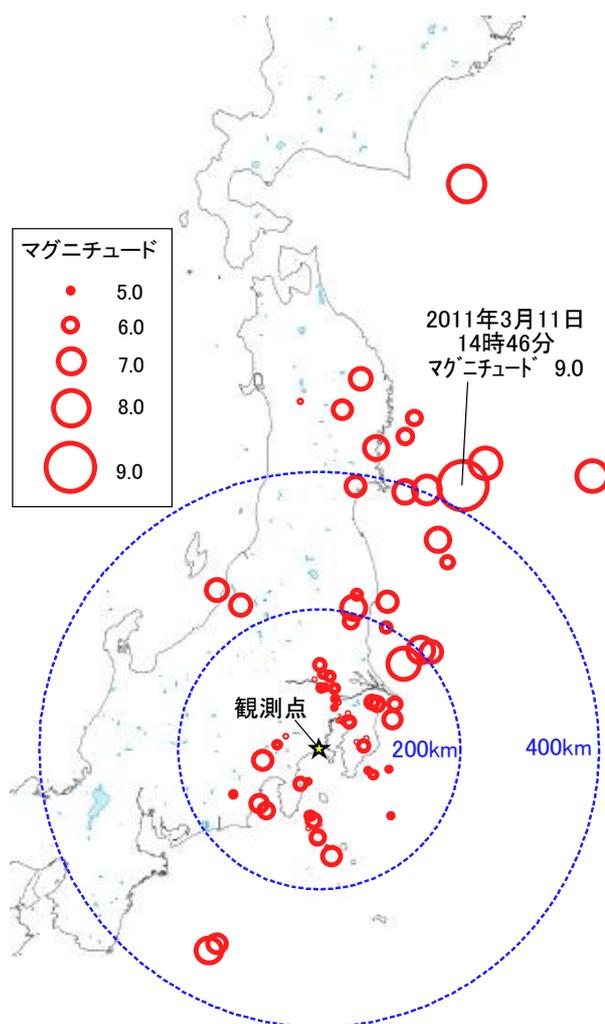


図-2 震源位置と建設地の関係

表-4 2000年4月から2012年4月までの上位20地震概要一覧

地震No.	発生日時		震源地	マグニチュード	震源深さ (km)	震央距離 (km)	観測最大加速度	
							位置(方向)	(gal)
1	2000/07/15	10:30	新島・神津島近海	6.3	5	100	東端基礎 (NS)	38.03
2	2000/07/30	21:26	三宅島近海	6.4	18	148	東端基礎 (NS)	14.72
3	2001/12/08	04:08	神奈川県西部	4.5	24	49	中央基礎 (EW)	14.94
4	2003/09/20	12:55	千葉県東方沖	5.8	70	66	中央基礎 (EW)	23.09
5	2003/10/15	16:30	千葉県北西部	5.1	74	55	東端1階梁 (NS)	16.44
6	2004/07/17	15:10	房総半島南東沖	5.5	69	86	中央基礎 (EW)	20.59
7	2005/07/23	16:35	千葉県北西部	6.0	73	60	西端1階梁 (NS)	44.75
8	2005/08/16	11:47	宮城県沖	7.2	42	399	東端基礎 (NS)	22.16
9	2006/05/02	18:24	伊豆半島東方沖	5.1	15	47	東端基礎 (NS)	33.00
10	2006/10/14	06:38	千葉県南東沖	5.1	64	79	中央基礎 (EW)	19.59
11	2009/08/11	05:07	駿河湾	6.5	23	113	東端基礎 (NS)	31.09
12	2011/03/11	14:46	三陸沖	9.0	24	428	東端基礎 (NS)	81.97
13	2011/03/11	15:15	茨城県沖	7.7	43	177	中央1階梁 (EW)	38.13
14	2011/03/15	22:31	静岡県東部	6.4	14	79	東端基礎 (NS)	31.78
15	2011/04/07	23:32	宮城県沖	7.2	66	385	東端基礎 (NS)	14.75
16	2011/04/11	17:16	福島県浜通り	7.0	6	209	東端基礎 (NS)	16.75
17	2011/04/16	11:19	茨城県南部	5.9	79	121	東端基礎 (NS)	16.00
18	2011/08/01	23:58	駿河湾	6.2	23	114	東端基礎 (NS)	16.97
19	2012/01/28	07:43	山梨県東部・富士五湖	5.4	18	59	西端基礎 (NS)	18.53
20	2012/03/16	04:20	埼玉県南部	5.3	94	66	東端1階梁 (NS)	18.88

#### 4. 観測された地震動の特性

##### 4.1 代表的な観測結果概要

表-4の地震データのうち、既報<sup>2)</sup>で報告していない地震(No.9以降)について、最大加速度が30gal程度で震央距離が異なる3つの地震データの加速度時刻歴とフーリエスペクトルを図-3~図-5に示す。伊豆半島東方沖で発生し、震央距離が47kmと最も短い地震No.9を図-3、駿河湾で発生し、震央距離が113kmの地震No.11を図-4、茨城県沖で発生し、震央距離が177kmの地震No.13を図-5に示す。なお、いずれも支持層の地震動に近い西端基礎部(NS)のデータである。

フーリエスペクトルから明らかなように、震央距離が長くなるほど卓越する周期帯が長周期側に移行しており、加速度時刻歴からもその傾向が確認できる。また、震央距離が長くなるほど継続時間が長くなる傾向も見られる。このような、地震波の卓越周期および継続時間と震央距離との関係については、既報<sup>2)</sup>においても同様の傾向が確認されている。

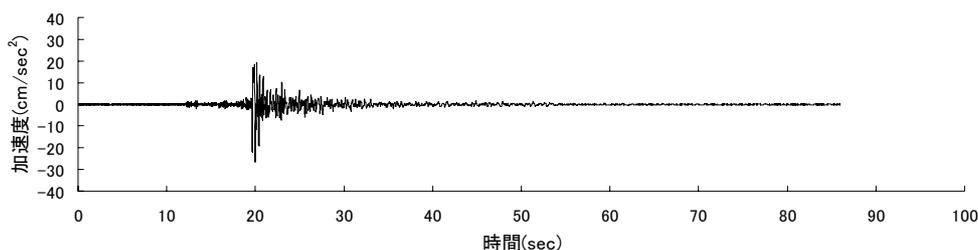


図-3 地震 No. 9 の加速度時刻歴とフーリエスペクトル (震源地：伊豆半島東方沖、震央距離：47km)

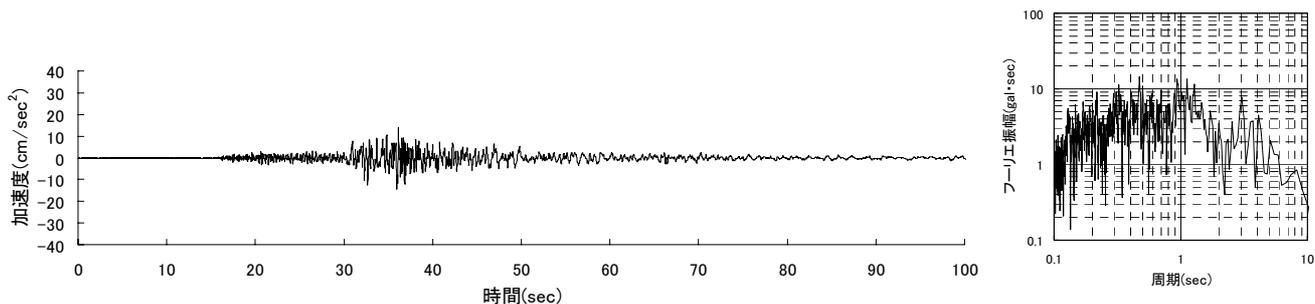


図-4 地震 No. 11 の加速度時刻歴とフーリエスペクトル (震源地：駿河湾、震央距離：113km)

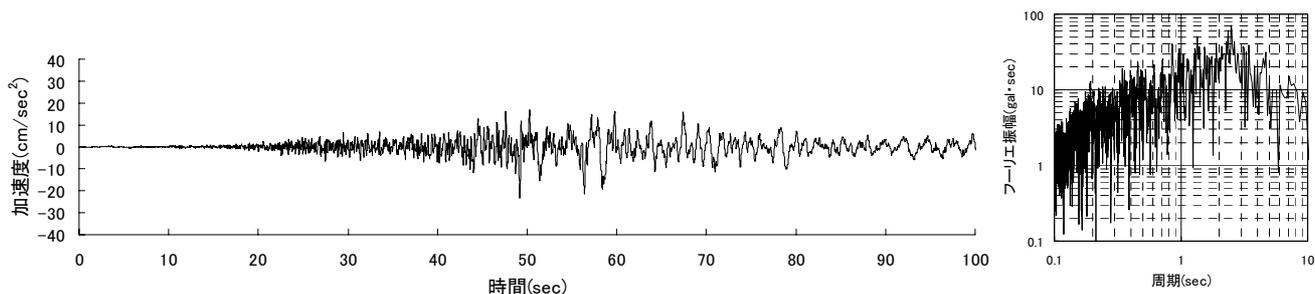


図-5 地震 No. 13 の加速度時刻歴とフーリエスペクトル (震源地：茨城県沖、震央距離：177km)

##### 4.2 基礎部における最大加速度の分布

全98データの基礎部の最大加速度について、横軸を西端部の最大加速度(NS)、縦軸を中央部および東端部の最大加速度(NS)とした関係を図-6に示す。図には近似直線も併せて示す。

図からわかるように、直接基礎である西端部の最大加速度に対し、杭基礎である東端部の最大加速度が増大する傾向がある。近似直線によると、4割弱の増大が見られ、相関係数も0.93と比較的高い。これは、東端部の表層地盤による地震波の増幅が影響しているものと考えられる。一方、中央部の最大加速度については、西端部に対する増大は見られない。

表層地盤による地震波の増幅について傾向を調べるため、縦軸を基礎部の最大加速度比率(東端部の最大加速度/西端部の最大加速度)とし、横軸を基礎西端部の最大加速度とした関係を図-7に示す。なお、図中には、地震No.12(東北地方太平洋沖地震)のデータを明示した。

図-7によると、基礎部に入力される地震波の加速度が大きくなるにつれて、最大加速度比率のばらつきが小さくなり、一定の比率に近付いていく傾向が見られる。

一方、表層地盤による地震波の増幅特性には、支持層における地震波の周期特性も大きく影響するものと考えられる。そこで、地震波の周期特性に大きく影響する震央距離と最大加速度比率との関係を図-8に示す。なお、西端部の最大加速度の影響も併せて考慮するため、図中のプロットを最大加速度の大きさに応じて区別している。

図-8によると、明確な相関関係があるとは言いが、西端部の最大加速度に関係なく、震央距離が長くなるにつれて最大加速度比率が大きくなる傾向が見られる。4.1でも示したように、震央距離が長くなると、地震波が建設地に伝播するまでに短周期成分が減衰するため、地震波の卓越周期が長周期寄りになる傾向がある。本建設地

のようにやや軟弱な表層地盤では長周期成分の影響を受け易いことから、震央距離が長くなるにつれて、東側基礎部への入力地震波が増幅する傾向があるものと考えられる。

#### 4.3 1階梁部における最大加速度の分布

全98データの1階梁部の最大加速度について、横軸を西端部の最大加速度(NS)、縦軸を中央部および東端部の最大加速度(NS)とした関係を図-9に示す。図には近似直線も併せて示す。

基礎部での関係を示した図-6と比較すると、図-9に示す1階梁部では西端部に対する東端部の最大加速度の増大が小さい。近似直線によると、2割弱の増大が見られ、相関係数が0.93となっている。中央部の最大加速度については、基礎部と同様に、西端部に対する増大は見られない。

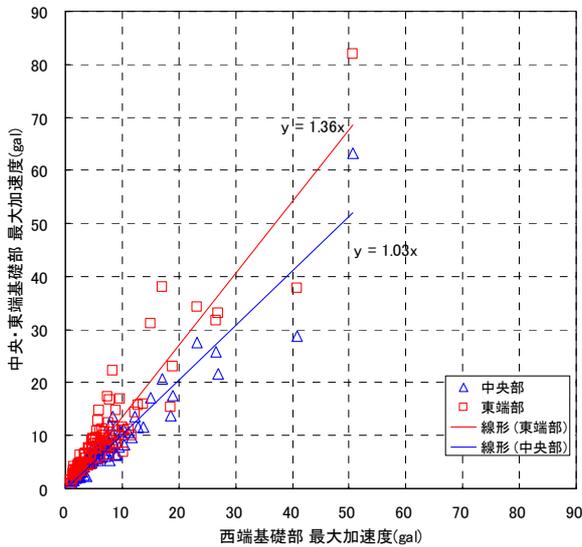


図-6 基礎部における最大加速度の関係

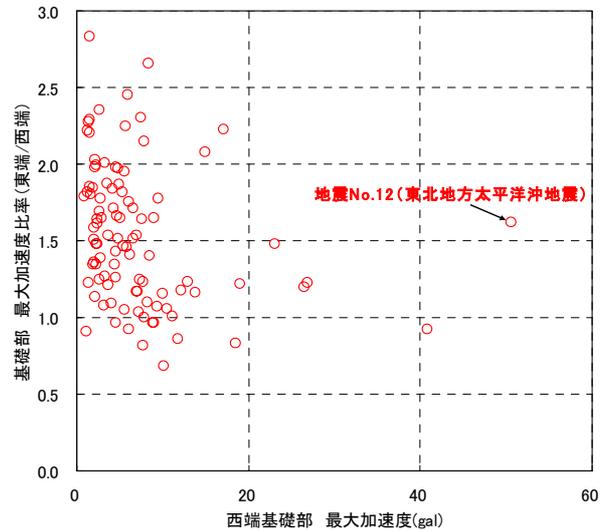


図-7 基礎部における最大加速度比率(東端/西端)と入力最大加速度との関係

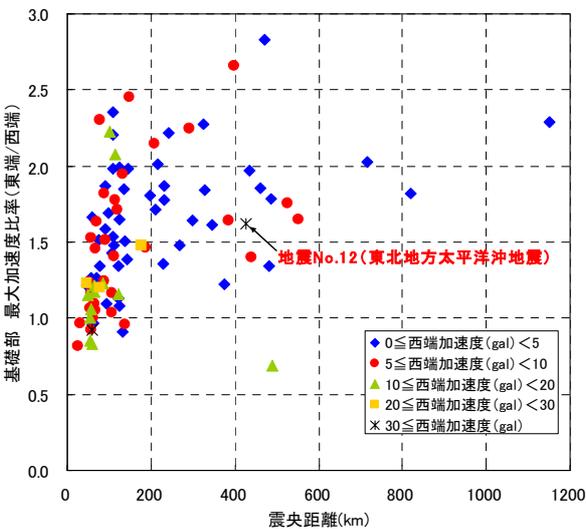


図-8 基礎部における最大加速度比率(東端/西端)と震央距離との関係

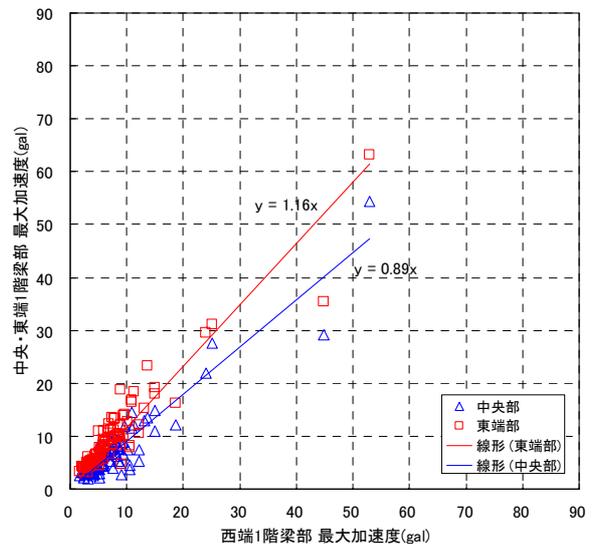


図-9 1階梁部における最大加速度の関係

4.4 基礎部と1階梁部の加速度の関係

基礎各部の最大加速度を横軸とし、基礎部に対する1階梁部の最大加速度倍率を縦軸とした関係を図-10に示す。図より、基礎部の最大加速度が大きくなるにつれて、最大加速度倍率が低減し、ばらつきも小さくなっていく傾向が見られる。特に、基礎部の最大加速度が20gal以上になると、殆どのデータの最大加速度倍率が1以下となっており、免震装置による応答低減が確認できる。しかし、地震No.12の東北地方太平洋沖地震の場合にも見られるように、西端部の最大加速度倍率で1を超えるケースが散見される。これについては、周期特性や捩れの影響が考えられるが、原因は十分に解明できていない。

5. 東北地方太平洋沖地震時の観測記録

2011年3月11日の14時46分に三陸沖を震源として発生した東北地方太平洋沖地震(以下、地震No.12と称す)は、我国における観測史上最大規模のマグニチュード9.0を記録し、東北地方を中心とした関東以北の広範囲に未曾有の大災害をもたらした。ここでは、同地震時における本建物への入力地震動および建物の応答について考察を行う。

5.1 加速度時刻歴とフーリエスペクトル

地震No.12における基礎部および1階梁部の加速度時刻歴を図-11および図-12に示す。本地震は、震央距離が428kmと長く、継続時間の長い地震動となっている。また、免震効果により、1階梁部が長周期化されている様子がわかる。東端基礎部で最大加速度81.97galを記録しており、直上の東端1階梁部の最大加速度が63.25galであることから、上部構造で約23%低減されている。

次に、入力地震動と上部構造応答の卓越する周期帯を調べるため、図-11および図-12に示す時刻歴データのフーリエスペクトルを図-13および図-14に示す。ただし、時刻歴データから明らかなように、卓越する周期帯が時々刻々変化しているため、図-11および図-12に示すようなA~Dの4区間(それぞれ8192個のデータ)に分けてフーリエ変換を行った。

図-13に示す基礎部のフーリエスペクトルから、地震開始から約160secまでは短周期成分の割合が多く、それ以降では短周期成分が減衰して、長周期成分が卓越する様子が確認できる。

一方、図-14に示す1階梁部のフーリエスペクトルによると、上部構造は常に1~2sec付近に卓越する周期帯がある。これは建物の1次固有周期成分であり、特に主要動に相当する区間Bでは2.0sec付近に長周期化されている。区間によって変動するのは、高減衰積層ゴムの変形に応じて1次固有周期が変動するためと考えられる。

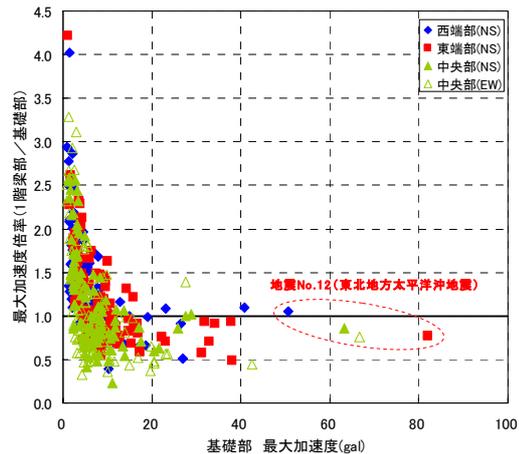


図-10 最大加速度倍率(1階梁部/基礎部)と基礎部最大加速度との関係

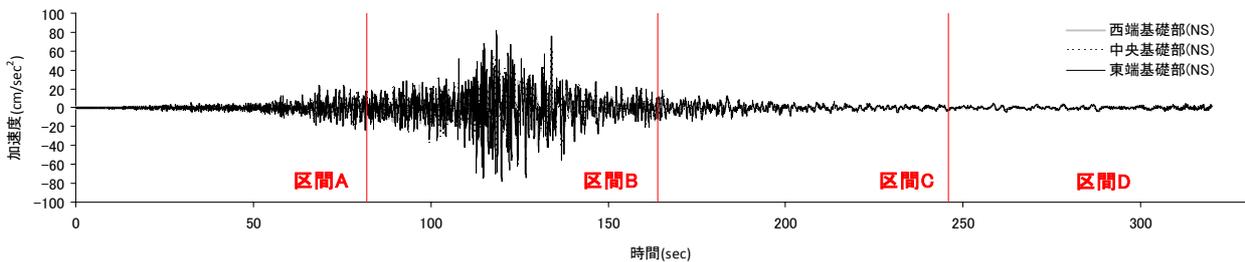


図-11 基礎部の加速度時刻歴(地震No.12)

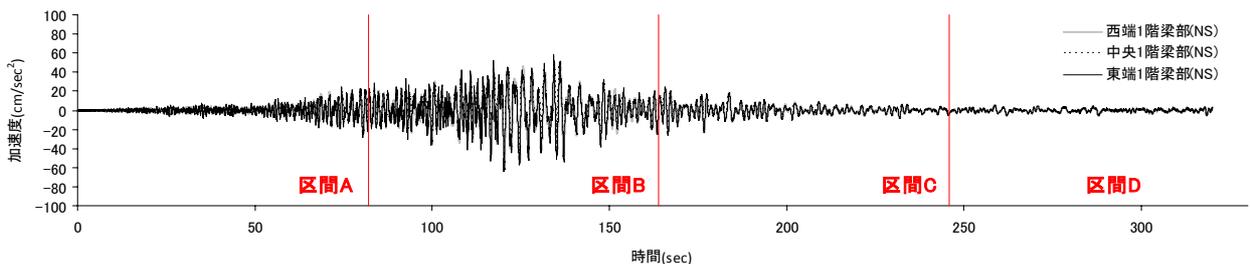


図-12 1階梁部の加速度時刻歴(地震No.12)

5.2 免震層の変形

1階梁部の相対変位を図-15に示す。変位時刻歴は、Trifunac法<sup>3)</sup>により求めた。図-15によると、相対変位の最大値は約4cmとなり、免震層のせん断ひずみで25%程度に相当する。また、同変形時の等価剛性から算定される1次固有周期はおおよそ1.9secとなり、図-14の区間Bにおける卓越周期とおおよそ一致する。

5.3 入力時震動の位相差の影響

基礎部および1階梁部における西端部と東端部（共に

NS)の加速度の関係を図-16および図-17に示す。

基礎部における関係を示した図-16によると、西端部と東端部の加速度が無相関に近い状態をループ形状を示しており、入力地震動に位相差があることがわかる。

一方、1階梁部における関係を示した図-17によると、概ね $y=x$ 上を推移しており、相関係数も0.91と比較的高いことから、基礎部と比較して、両者の応答に位相差が少なく、入力地震動の位相差による影響は比較的小さいことがわかる。

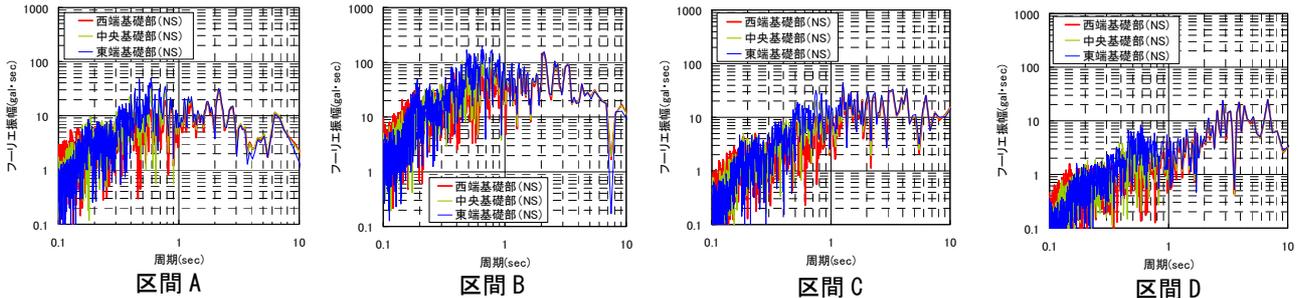


図-13 基礎部における加速度のフーリエスペクトル (地震 No. 12)

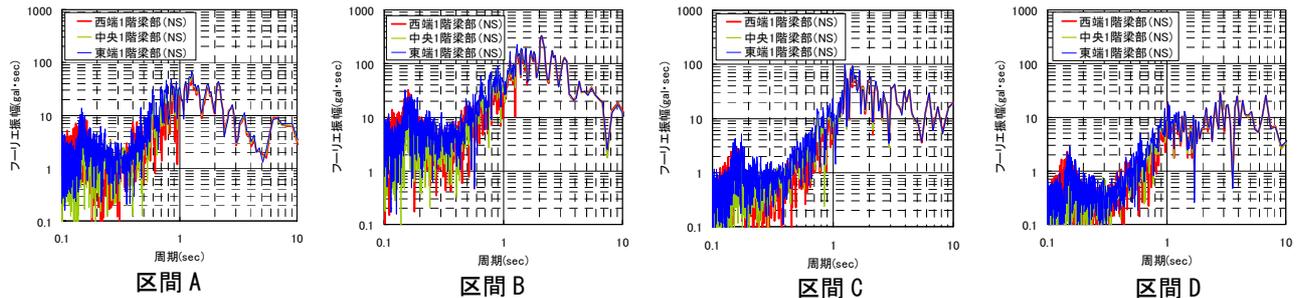


図-14 1階梁部における加速度のフーリエスペクトル (地震 No. 12)

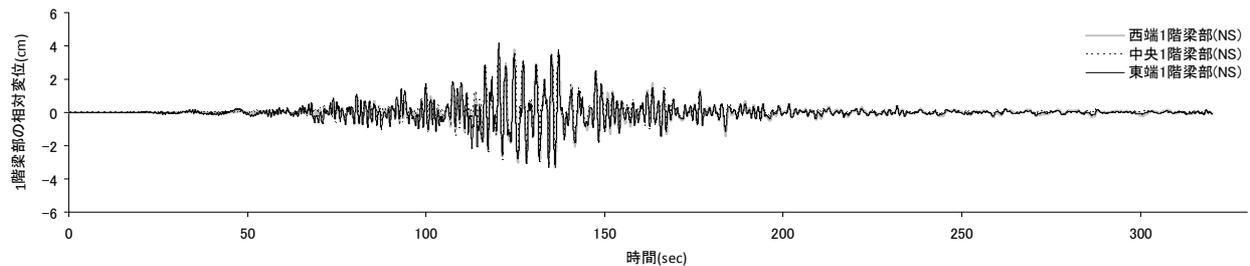


図-15 1階梁部の相対変位時刻歴 (地震 No. 12)

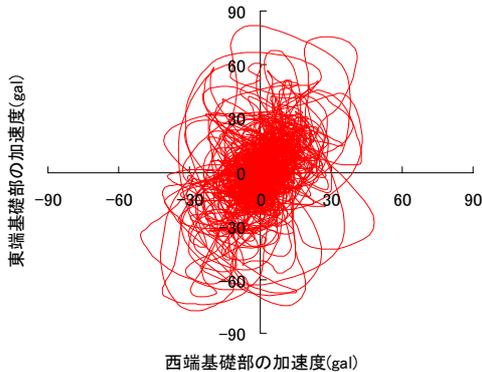


図-16 西端および東端基礎部の加速度の関係

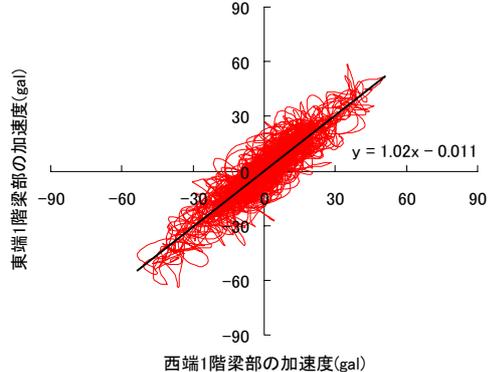


図-17 西端および東端1階梁部の加速度の関係

## 6. まとめ

長さが異なる杭を有する免震建物について、2000年から2012年までの地震観測結果を整理した。その結果、基礎部の最大加速度は、直接基礎である西端基礎部と比較して杭長の長い東端基礎部の方が大きくなる傾向があり、震央距離が大きくなるほど、その比率も増大する傾向が見られた。さらに、入力地震動がある程度大きい場合に、免震装置による上部構造の応答低減効果が確認された。

また、東北地方太平洋沖地震の観測結果では、西端および東端基礎部への入力地震動に位相差が生じていたこと、並びに、その位相差が上部構造の振動特性に与える影響は比較的少なく、上部構造は概ね並進振動していたことを確認した。

今後、更なるデータの蓄積および整理を行うとともに、建物および地盤の解析的検討などを通じて、入力地震動や上部構造応答の詳細について検討を行う予定である。

## おわりに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震で被災された方々に、心よりお見舞い申し上げます。

### [参考文献]

- 1) 山田有孝、三浦賢治、梅野岳：併用基礎構造物の弾塑性地震応答解析 その1-その2、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.397-400、1999.9.
- 2) 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.
- 3) M.D.Trifunac:Low Frequency Digitization Errors and a New Method for Zero Baseline Correction of Strong-Motion Accelerograms, California Institute of Technology, Report No.EERL 70-07 September,1970.