

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

Behavior of Seismic Isolated Building Supported by Various Length Piles

飛田 喜則*

菊地 克典*²

要 旨

長さの異なる杭で支持された比較的長大な平面形を有する基礎免震建物において地震動の観測をおこなっている。建物の基礎形式は、一端が直接基礎で支持され、支持地盤の傾斜に応じて長さが異なる杭によって支持されている。下部構造で観測される地震動は、表層地盤の層厚が深くなるに従って最大加速度が大きくなる。また、層厚の違いにより西端部と東端部では周期特性が異なり、かつ地震動に時間差が生じることが観測されている。これらによって下部構造にはねじれが生じるが、上部構造のねじれは比較的少なく並進的な挙動を示している。

キーワード：免震建物／地震観測／ねじれ／併用基礎／振動数

1. はじめに

一般に、基礎構造の設計において支持地盤が一様でない敷地では異種の基礎形式が併用される。このような場合、杭に作用する水平力の分担率が明確でないため、杭の設計にはねじれなどに対して十分に考慮する必要があることが指摘されている。また、設計に用いられる入力地震動に表層地盤の特性を考慮するために、表層地盤を成層地盤と仮定した上で重複反射理論等によって地盤応答解析をおこなうが、支持層が傾斜しており成層地盤とみなせない場合では、その評価を適切におこなうことが困難となる。さらに、建築物が平面的に長くなると、それに入力される地震動の時間（位相）差によって基礎に鉛直軸周りに回転が生じ、さらに上部構造に大きなねじれが生じることも指摘されている。これらのことを検討するため、多くの設計法や解析による検討がなされている。

今回、地震観測をおこなった建物は、長辺の長さが約156mと長く、支持地盤が傾斜しているため基礎構造が直接基礎と杭長が異なる杭基礎の併用基礎となっている免震建物である。この地盤形状のため、基礎底版の地震動には並進以外にねじれが発生することが予想され、それに対して上部構造の応答がどのような影響を受けるかを検討しておくことが重要であると考えられた。

本報は、このように平面形状が長大であり、かつ異なる長さの杭を有する免震建物で観測された地震動記録をもとに、地震動の特性と基礎底版および上部構造の挙動について検討した結果を述べるものである。

2. 観測建物概要

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に示す。対象建物の概要を表－1に示す。本建物は、神奈川県逗子市に建設され、6階建て、軒高さが17.55mの鉄筋コンクリート造の免震構造である。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であり、上部構造では長辺方向の中央部でエキスパンションジョイントによってA棟、B棟に分けられている。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た基礎免震構造である。なお、今回、地震動の観測は、B棟のみでおこなっている。

表－1 建物概要

建 築 場 所	神奈川県逗子市	
用 途	共同住宅	
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	

*構造研究グループ *²東京本店設計部 構造グループ

2.2 地盤概要

敷地東側の地盤の概要を表－2に示す。本建物の地盤は、土丹層を基盤とし、その上にシルト主体の沖積層があり、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/sであり、ポアソン比は約0.495である。土丹層は、せん断波速度（Vs）が730m/sであり、敷地内で東西に傾斜しているため最大で約23.5mの高低差を有しており、その最大傾斜角度は30度程度である。シルト層が最深となるB棟の東側では、常時微動測定の結果より、その卓越周期は約0.70秒であった。

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。免震装置の個数は、ゴム直径が650mm～900mm

のものがA棟に33基、B棟に24基

である。また、免震装置の剛心を上部構造の重心と一致するように配置している。なお、免震装置のせん断ひずみが0.1の場合の水平剛性の設計値は、1229.4kN/mであり、その時の固有周期は、1.66秒である。

2.4 基礎構造概要

支持層は、N値が50以上の土丹

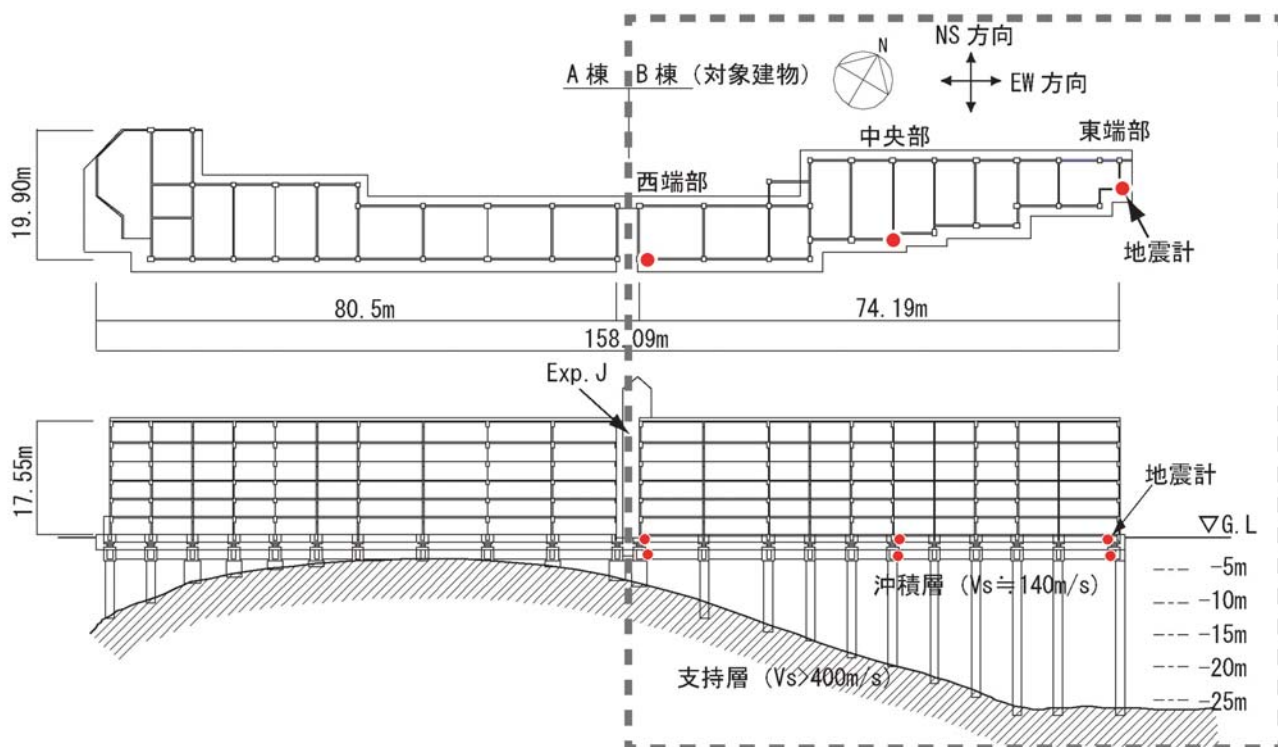
層である。前述したように、この土丹層が傾斜しているため、基礎形式は、敷地中央部付近（B棟西端部）では直接基礎形式（独立基礎）であり、それ以外は、支持層の深さによって長さが異なる場所打ちコンクリート杭とし、基礎形式を併用している。

表－2 地盤概要

深さ (GL-m)	地層	湿潤密度 (g/cm 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	1.7	2～15	140	1400
8.40	シルト	1.8	2～3		
19.40	シルト	1.7	2～3		
23.70	粘土質シルト	1.8	3～4	270	1560
25.10	砂混じり土丹塊	1.9	14		
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
ゴム層厚h（mm）		162	162	162	160	160
水平剛性 Kh（N/mm）		36.30	42.23	48.61	55.01	70.15
個数	A 棟	6	8	—	12	7
	B 棟	1	—	16	5	2



図－1 対象とした建物の平面図および断面図

2.5 地震計概要

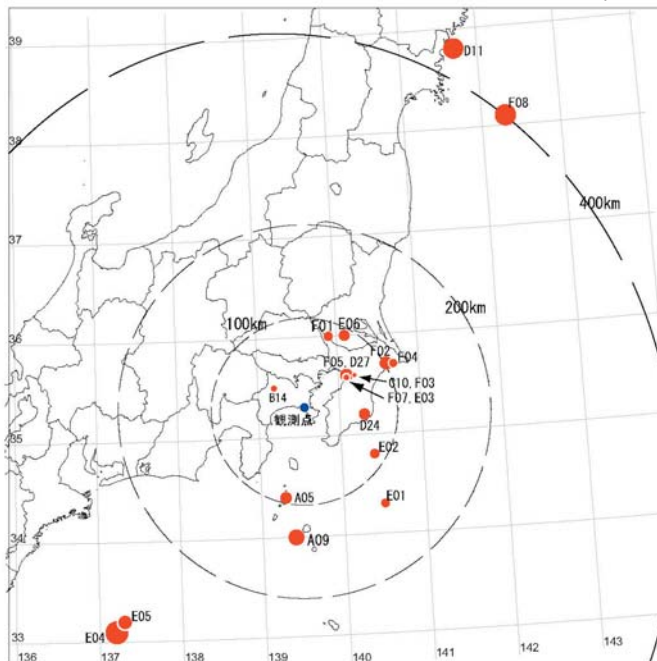
地震計は、0.1Hz～30.0Hzの領域でほぼ平坦な感度特性を持つサーボ型の加速度型地震検出器である。地震計の設置位置および観測方向を図－1に示す。地震計の設置位置は、B棟の基礎底版（以後、下部構造と称する）および上部構造の1階床（以後、上部構造と称する）とし、それぞれ東端部、中央部および西端部としている。

また、観測方向は、中央部では長辺（E-W）方向、短辺（N-S）方向および上下（U-D）方向の3成分とし、

表－4 対象とした地震概要一覧表

地震No.	発生日時	震源地	M	震源深さ(km)	震央距離(km)	観測最大加速度(gal)
A05	'00/07/15 10:30	新島・神津島近海	6.3	5	100	38.03
A09	'00/07/30 21:26	三宅島近海	6.4	18	148	14.72
B14	'01/12/08 4:07	神奈川県西部	4.5	24	46	14.94
C10	'02/05/19 5:00	千葉県北西部	4.6	72	70	12.5
D11	'03/05/26 18:25	宮城県沖	7.0	71	433	13.34
D24	'03/09/20 12:55	千葉県東方沖	5.8	70	66	23.09
D27	'03/10/15 16:30	千葉県北西部	5.1	74	55	16.44
E01	'04/04/07 22:47	房総半島南東沖	4.9	46	138	10.28
E02	'04/07/17 15:10	房総半島南東沖	5.5	69	86	20.59
E03	'04/08/06 3:23	千葉県北西部	4.6	75	56	10.63
E04	'04/09/05 23:58	東海道沖	7.4	44	327	8.34
E05	'04/09/07 8:30	東海道沖	6.4	41	300	8.94
E06	'04/10/06 23:41	茨城県南部	5.7	66	90	10.41
F01	'05/02/16 4:46	茨城県南部	5.4	45	87	13.22
F02	'05/04/11 7:22	千葉県北東部	6.1	52	106	9.03
F03	'05/04/11 15:35	千葉県北西部	4.4	73	63	11.28
F04	'05/06/20 1:15	千葉県北東部	5.6	51	112	9.38
F05	'05/07/23 16:35	千葉県北西部	6.0	73	60	44.75
F06	'05/07/23 16:37	千葉県北西部	4.5	68	61	8.28
F07	'05/08/07 1:05	千葉県北西部	4.7	73	57	11.06
F08	'05/08/16 11:47	宮城県沖	7.2	42	399	22.16

Mはマグニチュードを示す



図－2 震源位置図

西端部および東端部では短辺（N-S）方向の1成分としている。なお、サンプリング周波数は100Hzである。

3. 対象地震概要

対象とした地震は、2000年4月から2005年8月までに発生し、本建物で観測された地震動のうち、加速度が大きい順に20地震とした。表－4に対象とした地震の発生日時、震源地、マグニチュード（M）などの一覧を示す。また、震源と建設地との関係を図－2に示す。なお、本論では、各地震を表－4の地震No.にて表すこととする。

これらの対象地震は、震央距離が39km～433km、マグニチュードが4.4～7.2の範囲にある。それらのうち千葉県付近で発生した地震が半数あり、また2003年5月26日と2005年8月16日に宮城県沖で発生した地震、2004年9月に紀伊半島沖で発生した地震などが含まれている。図－3に、観測された地震動のマグニチュードと震央距離の関係を示す。本建物で観測された地震動は、震央距離100km付近（千葉県付近）ではマグニチュードが4.0～7.0の範囲の地震であり、震央距離300km以上ではマグニチュードが6.0以上の地震から発生したものである。

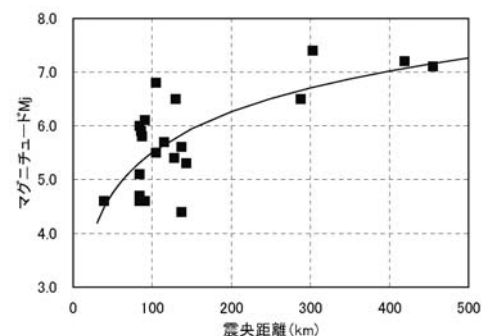
本期間内で観測された地震動は、最大加速度が44.75gal、震度がⅢであるために建物や基礎に被害が生じるようなことはなかった。

4. 下部構造の地震動

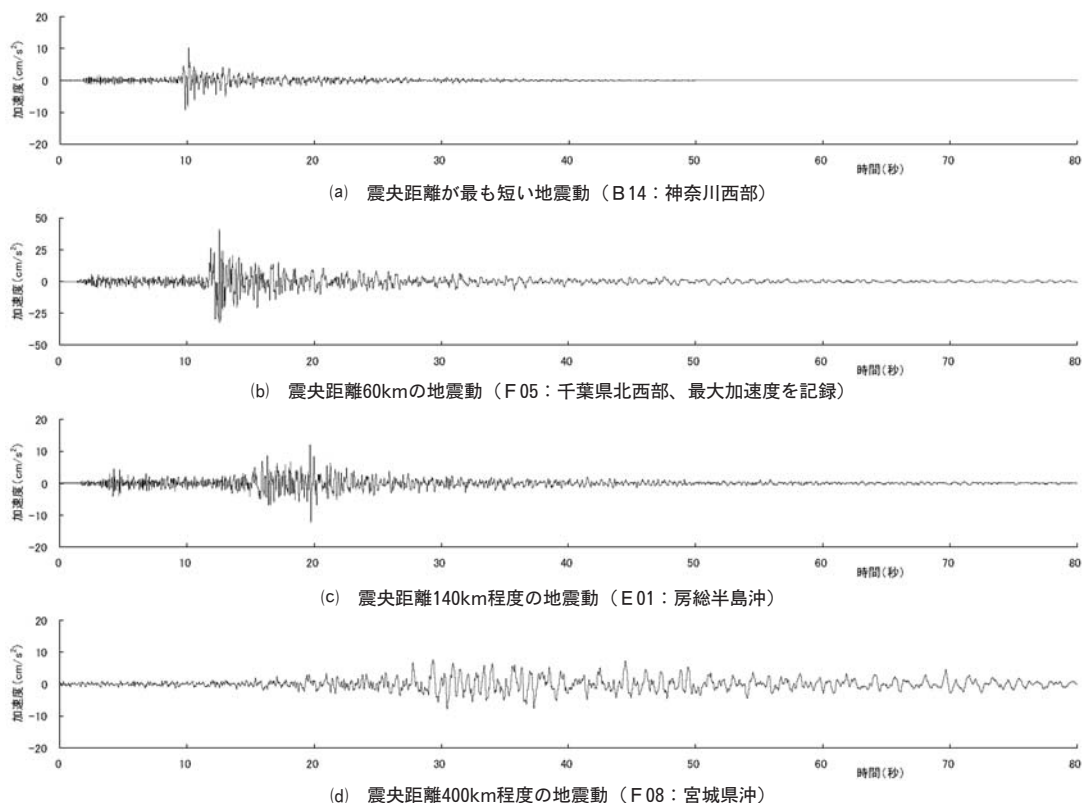
下部構造で観測された地震動をもとに、本建物へ入力された地震動の特性について検討する。

4.1 加速度時刻歴

代表的な加速度時刻歴を図－4に示す。図－4(a)は本建物と最も近くで発生した地震B14（震央距離46km）、図－4(b)は観測された地震



図－3 震央距離とマグニチュードの関係

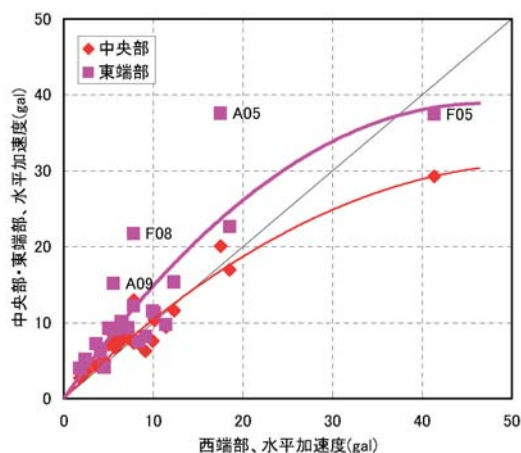


図－4 観測された下部構造の地震動の代表例

動の中で最も加速度が大きく、震央距離が60kmである地震F05、図－4(c)はそれよりも震央距離が138kmとやや長く房総半島沖で発生した地震E01、さらに図－4(d)は震央距離が約400kmである宮城県沖で発生した地震F08の4地震である。これより、震央距離が短い地震である地震B14や地震F05では短周期成分が多く、震央距離が長くなる地震E01では、それらよりも周期と継続時間がやや長くなっている。さらに、震央距離が長い地震F08では、主要動が明確でなく継続時間の長い地震動となっている。

4.2 最大加速度値

下部構造での最大加速度値について、西端部に対する中央部および東端部との最大加速度値の関係を図－5に示す。図には、各観測点での近似曲線を示している。図より、直接基礎である西端部の加速度に対する中央部および東端部の加速度は、西端部の加速度が20gal程度までは表層地盤の影響により大きくなる傾向があるが、震央距離が近く西端部の加速度が大きかった地震F05ではやや小さくなっている。また、遠くで発生してマグニチュードが大きい地震A09、A05およびF08は、小さい加速度であるが他の地震動に比べると表層地盤での増幅が大きい傾向がある。

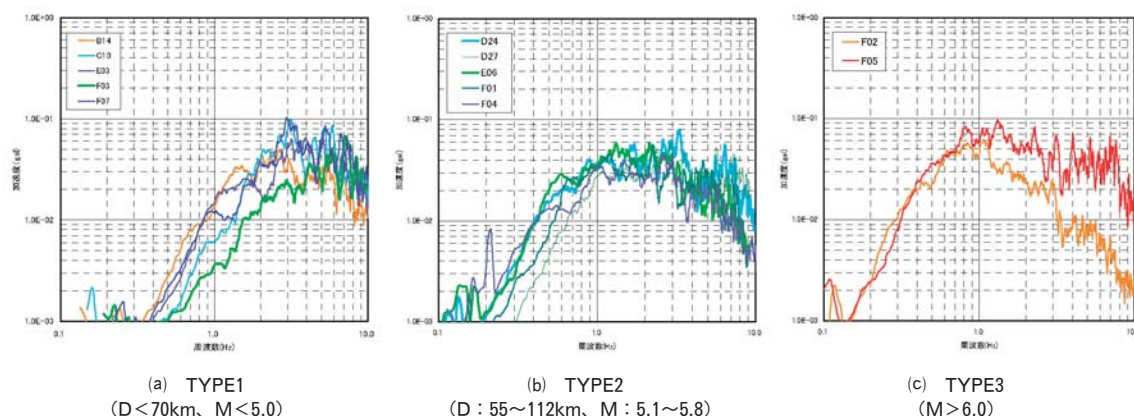


図－5 下部構造の西端部に対する中央部および東端部の加速度との関係

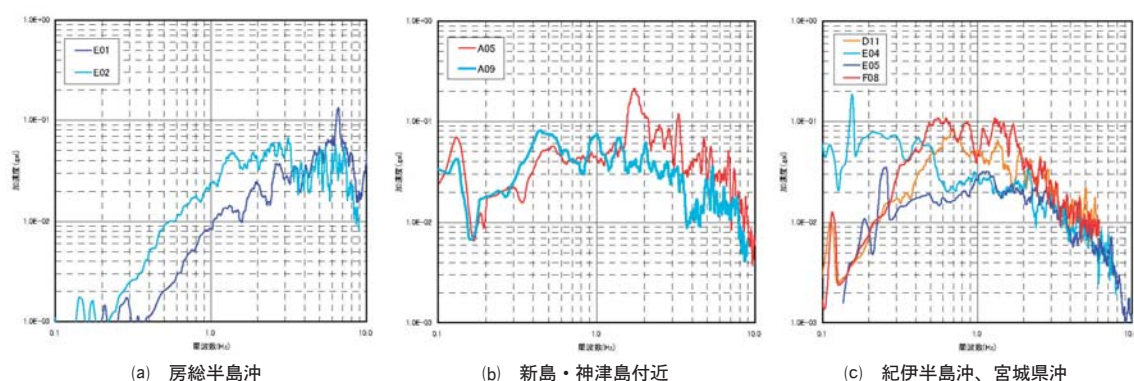
4.3 近距離（千葉県付近）で発生した地震の特性

観測された地震動の半数は千葉県で発生した地震動であり、本建物から見れば東側の比較的同じような方向で発生している。しかし、それらのマグニチュードは4.5～6.1、震央距離は約55～112kmと様々である。このように、発生した方向（伝播経路）がほぼ同じであるが、マグニチュードや伝播距離の違いが地震動におよぼす影響について検討する。

これらの地震動を3種類のタイプに分けて、フーリエスペクトルを図－6(a)～(c)に示す。ここで、図－6(a)は、



図ー 6 千葉県付近で発生した地震動のフーリエスペクトル



図ー 7 震央距離が100km以上の地震動のフーリエスペクトル

震央距離（D）が70km以下の場所で発生し、マグニチュードが5.0以下の地震動である。図ー 6 (b)は、震央距離が55～112kmの場所で発生し、マグニチュードが5.1～5.8の地震動である。さらに図ー 6 (c)は、マグニチュードが6.1と6.0とほぼ同じ地震F02およびF05であるが、それらの震央距離が106kmと60kmで大きく異なる。

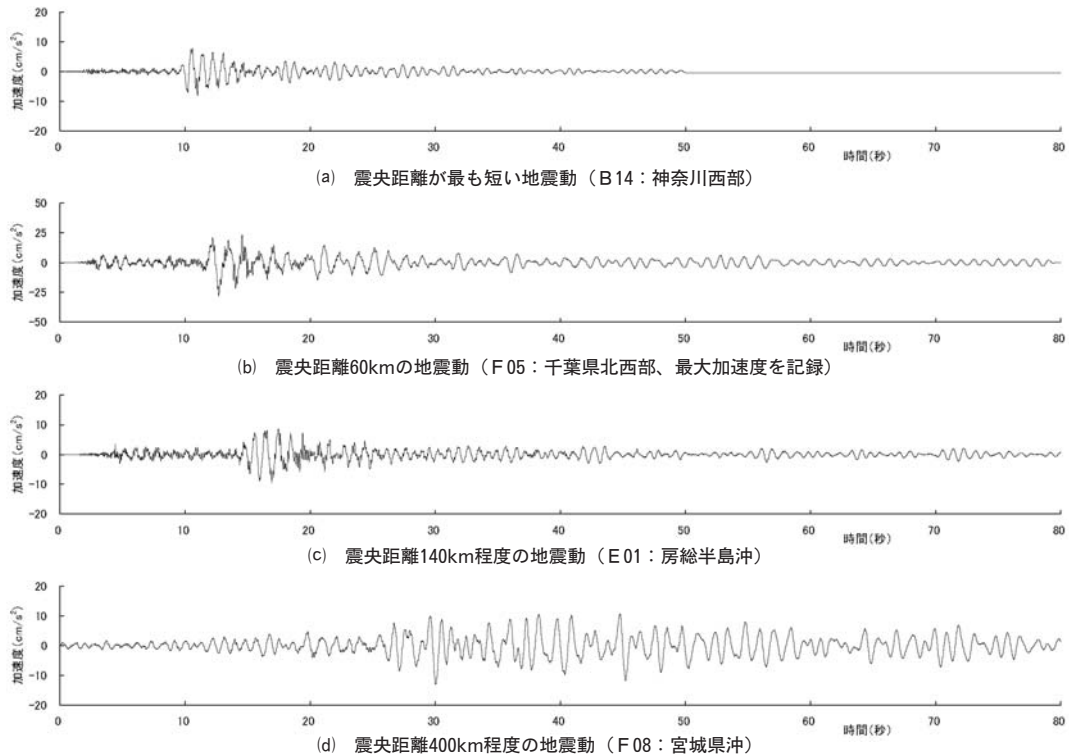
図ー 6 (a)より、比較的近距离であり地震規模の小さな地震の場合、3Hz付近および5～6Hz付近に卓越した高い振動数域の成分が多くなる。図ー 6 (b)より、図ー 6 (a)の地震と比べて震央距離がやや遠く、かつマグニチュードが大きい地震では、1.0～3.0Hzの振動域の成分が優勢であるが明確な卓越振動数がみられない。図ー 6 (c)では、0.8～2.0Hz付近の振動数が卓越しており、先の2種類と比べてやや低い振動数となっている。また、地震F02は、地震F05と比べると低い振動数成分が少なくなっており、伝播する際に高振動数域が減少したものと考えられる。

このように、千葉県付近で発生した地震動であっても、その震央距離が少し異なることやマグニチュードが異なることなどによって観測される地震動の周波数特性に明らかに差が生じている。

4.4 中・遠距離で発生した地震動の特性

震央距離が100km以上となる地震動を対象として、それらの特性について検討する。これらの地震動のフーリエスペクトルを図ー 7 (a)～(c)に示す。図ー 7 (a)は、房総半島沖で発生した地震動E01とE02である。図ー 7 (b)は、2000年7月の三宅島付近の群発地震の時に発生した地震A05および地震A09であり、マグニチュードがほぼ同じであるが、震央距離が100km、148kmと地震A09の方が遠方で発生している。図ー 7 (c)は紀伊半島沖で発生した地震E04およびE05、宮城県沖で発生した地震D11およびF08であり、震央距離が300km以上の地震である。

図ー 7 (a)より、地震E02は、図ー 6 (b)に示した地震と特徴が似ているが、地震E01は、震央距離が遠いにもかかわらず高い振動数が多く、特に7.0Hz付近が卓越している。図ー 7 (b)より、遠方で発生している地震A09の方が0.3～0.6Hz付近の振動数域が増加しており、地震A05は高い振動数成分が多く、特に1.75Hz付近が卓越している。地震A05において、1.75Hzの震動が卓越することは、表層地盤の影響であると考えられるが、この地震動だけがこのように大きな影響を受けている原因については不



図－8 観測された上部構造の地震動の代表例

明である。さらに、図－7(c)より、これらの地震は震央が遠方であるため低い振動数成分が多い。地震D11とF08はほぼ同じような振動数特性を示すが、地震動E04とE05は、0.1～1.0Hzの振動数成分で大きく異なっている。

5. 免震建物の応答

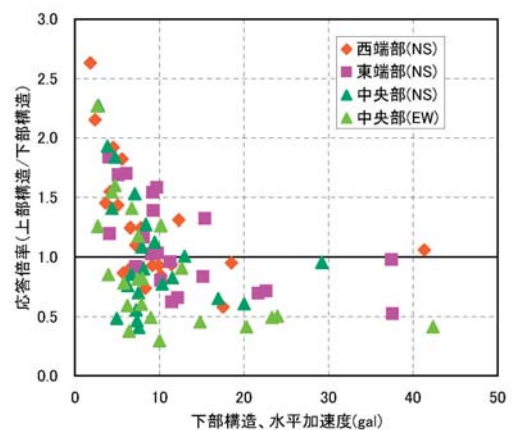
5.1 加速度時刻歴

図－4で示した地震について、上部構造で観測された加速度時刻歴を図－8に示す。図－8(a)～(c)では、免震建物としての固有周期で震動している。図－8(d)は震央距離が遠い地震であるため、下部構造と同様に継続時間が長い震動が続いている。

図－9に下部構造の最大加速度値と上部構造の応答倍率の関係を示す。これより、下部構造の加速度が10Gal以下では、応答倍率にばらつきが大きい、10Gal以上では上部構造の加速度が下部構造よりも低減する傾向が確認できる。ただし、F05地震は、対象地震で最大加速度を示した地震であるが、最大加速度値は低減していない。

5.2 周期特性

上部構造の中央部および東端部でのフーリエスペクトルを図－10(a)～(c)および図－11(a)～(c)に示す。それらの図の分類方法は図－6と同様である。また、下部構造の



図－9 下部構造と上部構造の加速度との関係

最大加速度値と上部構造（免震建物）の1次固有周期との関係を図－12に示す。図－10および図－11より、上部構造では約0.9～1.2Hz、および7.0Hzに卓越振動数が確認できる。前者の振動数での振幅が、中央部と東端部でほぼ同じ大きさであることから、免震建物としての1次固有周期（並進方向）である。後者の振動数の振幅が中央部では小さく東端部では大きいことから、ねじれ振動数であると考えられる。

図－12より、下部構造に入力される加速度値が大きくなるに従い、卓越周期は長周期側に移行する。また、図

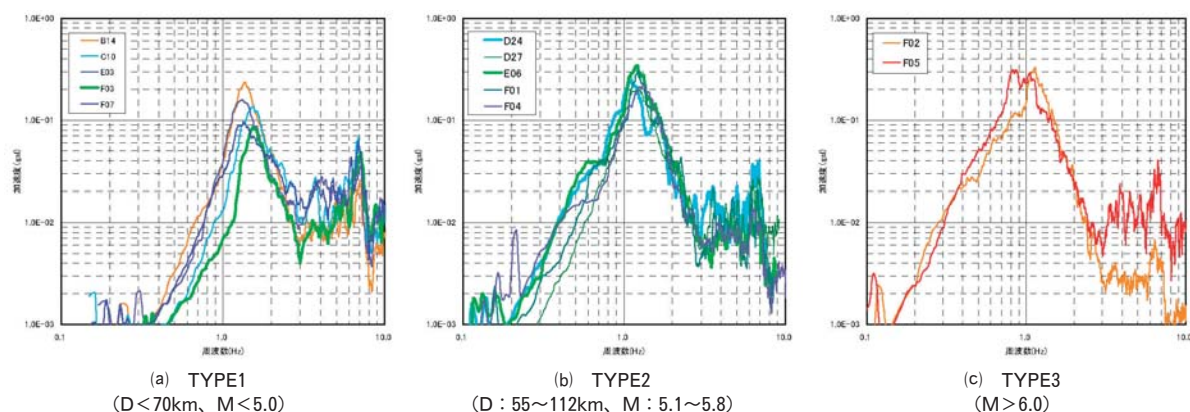


図-10 上部構造（中央部）のフーリエスペクトル

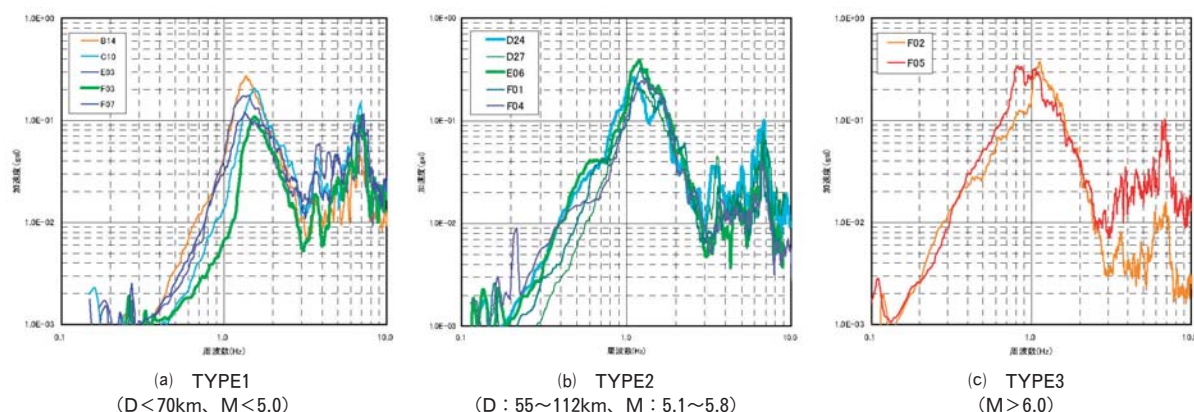


図-11 上部構造（東端部）のフーリエスペクトル

中で曲線で囲まれたように2種類に分類できる。1つは、震央距離が150km以下と短い地震であるために下部構造の地震動に短周期（高い振動数）成分が多く含まれており、それに伴って1次固有周期もやや短周期側となる。一方、震央距離が300km以上の地震では、下部構造の地震動に長周期（低い振動数）成分が多い地震であるため、1次固有周期はやや長くなる。ただし、加速度が大きくなる場合にはその周期の差は少なくなる。

5.3 ねじれに対する検討

ここでは対象地震の中で比較的大きな加速度を示した地震A05および地震F05の2つの地震動について検討する。地震A05の震央距離が約100kmであることに比べて、地震F05は千葉県内で発生し震央距離が約60kmと近距離の地震である。両地震のマグニチュードはそれぞれ6.3と6.0である。

5.3.1 加速度時刻歴

図-13、図-14に両地震の加速度時刻歴（N-S方向）を示す。これより、地震A05では、下部構造の西端部から中央部、東端部にかけて周期約0.9秒の地震動が次第に増幅しており、全時間帯で相似的に大きくなっている。

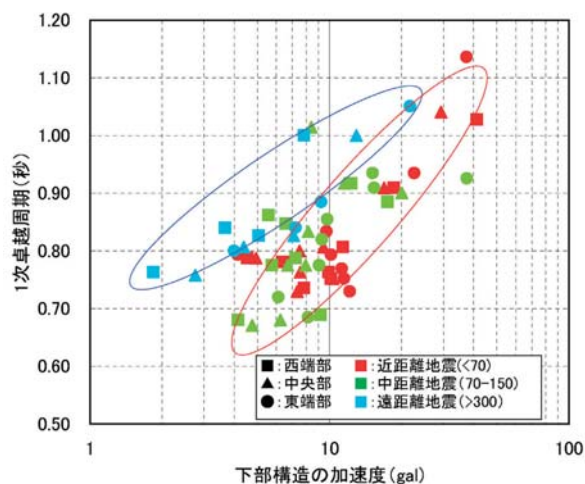


図-12 下部構造の加速度と卓越周期の関係

一方で地震F05は、主要動の前半（時間15秒～18秒）が短周期の震動であり、西端部と東端部では加速度の大きさはあまり変わらないが、後半（18秒～23秒）では周期特性が明らかに異なり、A05と同様に表層地盤の影響により東端部で増幅している。このように下部構造の加速度時刻歴には、支持層に到達した地震波が表層地盤を上昇してきたと考えられる成分が含まれており、杭長（支

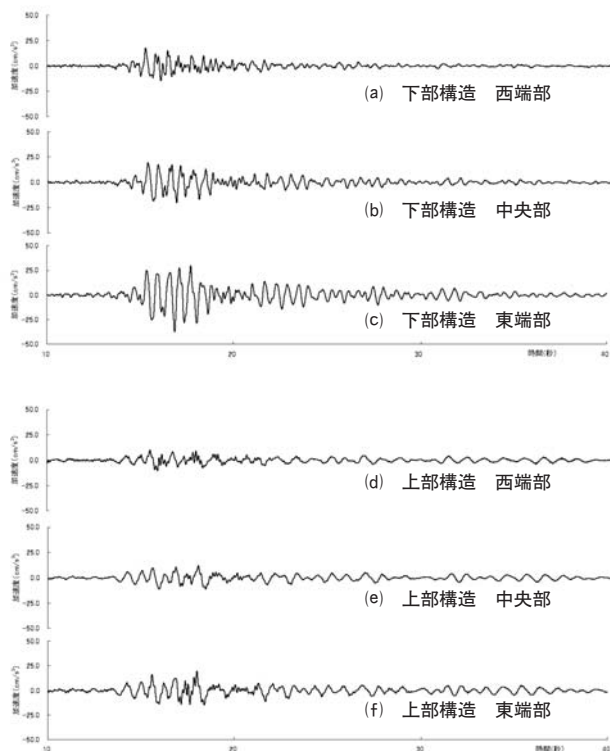


図-13 地震A05の加速度時刻歴

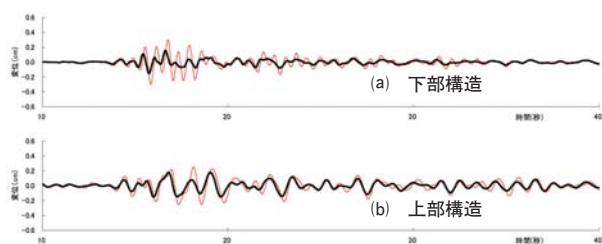


図-15 地震A05の変位時刻歴
(太線：西端部、細線：東端部)

持層までの深さ) による影響を大きく受けていると考えられる。

上部構造の加速度時刻歴は、中央部と比べると東・西端部で短周期の振動数が多くなっており、上部構造のねじれによる加速度の増加が見られる。このように、下部構造の短周期の震動が上部構造のねじれに影響を与えて大きな加速度を示している。

5.3.2 変位時刻歴

加速度時刻歴を積分して求めたそれぞれの変位時刻歴波形を図-15および図-16に示す。図は西・東端部の変位時刻歴を重ねて示している。図-15より地震A05では下部構造の変位が、加速度と同様に西端部に比べて東端部の方が増幅している。しかし、上部構造の応答変位ではそれらの変位には差が少なく、ねじれが生じておらず並進的な挙動である。地震F05では、西端部と東端部の変位に差がみられない。

このように、免震装置を介することで地盤のねじれの

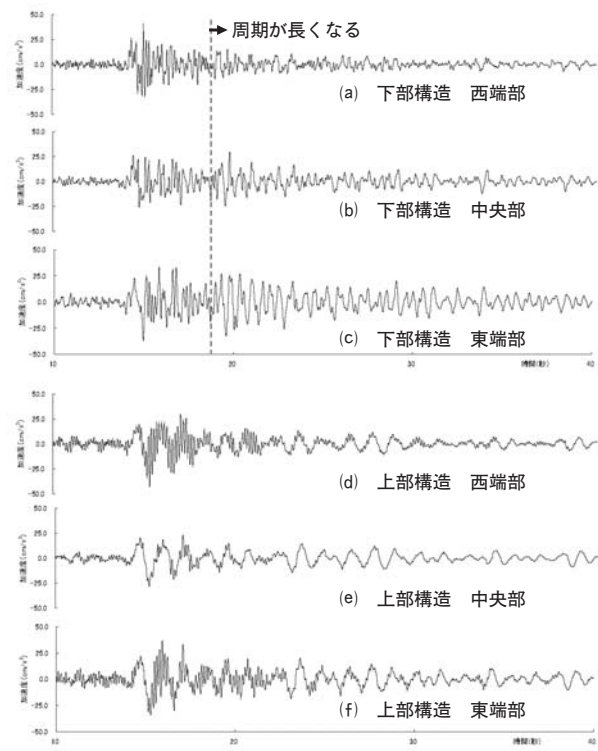


図-14 地震F05の加速度時刻歴

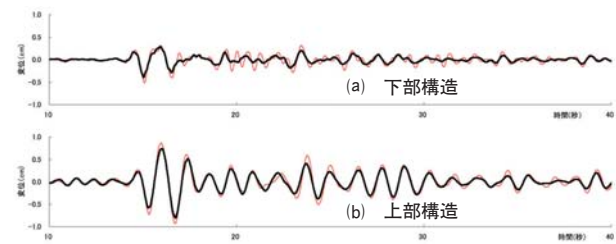


図-16 地震F05の変位時刻歴
(太線：西端部、細線：東端部)

変位に対して、上部構造ではその影響が少なくなる。

5.4 時間のずれ

下部構造における加速度または変位時刻歴の主要動部分、特に1Hz程度の震動に注目すると、西端部と東端部には約0.14秒のずれが生じている。これは、表層地盤のS波速度を140m/s、表層の厚さを20mとして支持基盤からの伝達時間を計算した時間とほぼ一致する。このことからこの成分の振動は、表層地盤を伝播することによる時間のずれが、下部構造にねじれを生じさせている。

6. おわりに

今回観測された地震動は、設計用入力地震動に比べてかなり小さかったが、そのマグニチュードや震央距離の差によって特性が異なること、免震建物のねじれに対する特徴などがみられた。

今後、地震観測を継続し、さらに検討をおこなう予定である。