

兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震動伝播挙動への地盤の影響の考察

那須誠¹・三村八一²

¹前橋工科大学教授 (〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町406-1)

E-mail:nasu@maebashi-it.ac.jp

²長岡技術科学大学大学院 (〒940-2188新潟県長岡市上富岡町1603-1)

E-mail:mimu@stn.nagaokaut.ac.jp

1995年1月の兵庫県南部地震の際にポートアイランドにおいて、地表付近で水平動成分が減衰するとともに鉛直動成分が増幅するという地震動が観測された。ポートアイランドの地盤と基礎免震工法建物における地震動伝播挙動に類似性があることから、いくつかの基礎免震工法建物での地震動伝播状況を取りまとめるとともに、ポートアイランドの地盤の地震応答解析を行うことによって、上記の地震動の発生原因の推定を行った。その結果、兵庫県南部地震の際にポートアイランドの地盤内の軟弱粘性土層が免震工法建物にある免震装置と同等の作用をもたらしたことが推察された。

Key Words : Seismic motion, Port island, seismic base isolation building, similar propagating behavior, similar stiffness structure, soft clay layer, seismic base isolation device

1. はじめに

近年、わが国では大地震が度々発生し様々な被害が発生している。兵庫県南部地震でポートアイランドでは液状化などの様々な被害を被った。そのポートアイランドにおいて地表付近で地震動の鉛直動成分が増幅するとともに水平動成分が減衰するという地震動が観測された。ポートアイランドの地盤と基礎免震工法建物の地震動伝播挙動に類似性があるため¹⁾、はじめにいくつかの基礎免震工法建物での地震動伝播状況を取りまとめ、次にポートアイランドの地盤の地震応答解析を行うことによって、ポートアイランドで観測された地震動の発生原因の推定を行った。

2. ポートアイランドでの地震動の記録の概要

図-1²⁾³⁾はポートアイランドにおいて観測された地震動の記録である。地表近くで鉛直動成分が急激に約3倍大きくなり、水平動成分が約0.6倍と小さくなっている。地震計設置地点の土層構成とN値分布と地震計設置状況を図-2⁴⁾に示す。N値分布を見ると、G.L.-16 m付近の埋立土層にN値が急激に低くなっている部分がある。この部分に軟弱な粘性土層が存在し、これが原因でこのような地震動が観

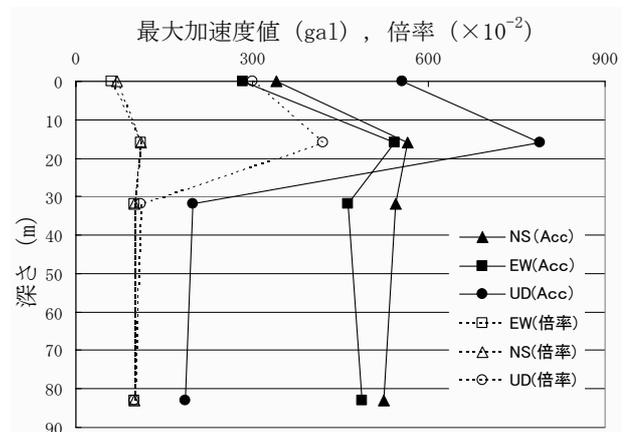


図-1 ポートアイランドの最大加速度分布と倍率²⁾³⁾

測されたことが推定される。なぜなら後述の基礎免震工法で建てられた建物でよく観測される地震動と免震基礎の関係に似ているからである¹⁾。

3. 基礎免震工法建物の地震動観測記録

(1) 対象建物の概要と地震計設置位置

今回調査対象とした基礎免震工法建物は表-1に

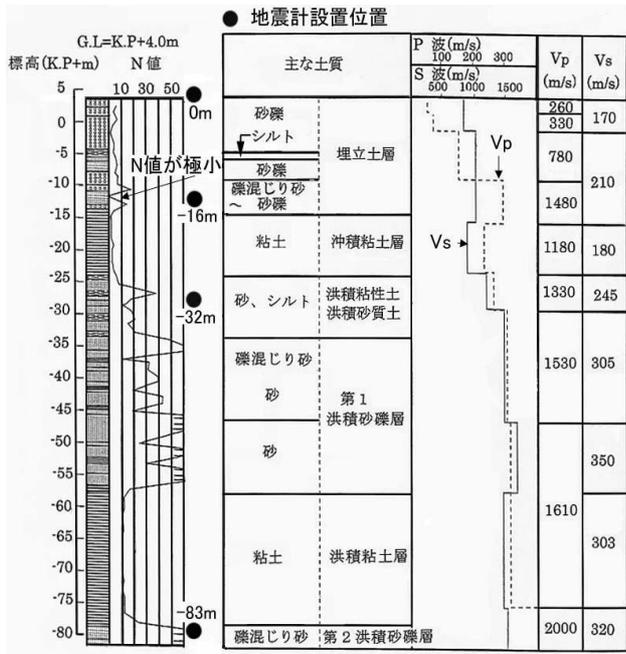


図-2 地震計設置点と土質柱状図⁴⁾

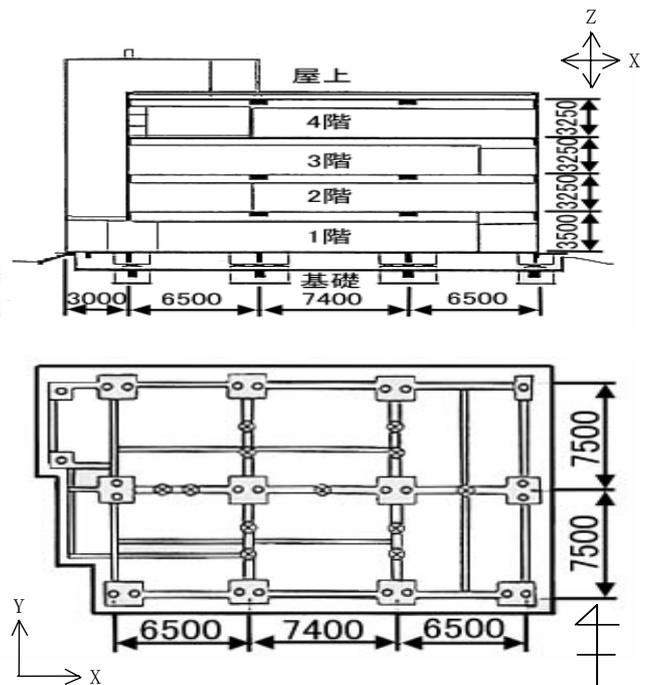


図-3 奥村組技術研究所研究棟の概要図⁶⁾

表-1 免震建物の概要及び固有周期

建物名	構造種別	階数	延床面積	免震部材	固有周期(s)
WESTビル ⁵⁾	SRC造	6階建	46823.09m ²	鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ54個 天然ゴム系積層ゴムアイソレータ66個 鋼棒ダンパー44個	3.3
(株)松村組技術研究所 研究棟 ⁵⁾	RC造	3階建	480.00m ²	高減衰型積層ゴムアイソレータ8個	1.9
小金井社宅 ⁵⁾	RC造	3階建	714.3m ²	鉛プラグ入り積層ゴムアイソレータ16個 天然ゴム系積層ゴムアイソレータ4個	
東北大学免震実証建屋 ⁵⁾	RC造	3階建	417.14m ²	天然ゴム系積層ゴムアイソレータ オイルダンパー	1.43 在来工法建物ではX方向：0.28,Y方向0.23
(株)奥村組筑波研究所 管理棟 ⁵⁾	RC造	4階建	1330.10m ⁴	天然ゴム系積層ゴムアイソレータ25個 鋼棒ダンパー12個	X方向：1.11~1.25, 0.13~0.17, 0.07~0.08 Y方向：1.11~1.25, 0.07~0.08 Z方向：0.08, 0.05~0.06

表-2 免震建物で地震動を観測した地震の諸元

建物名	階建	地震名	震度	発生年月日	規模	震央距離 (震源距離)
WESTビル ⁵⁾	地上6階 塔屋2階	兵庫県南部地震	V	1995年1月17日5時46分	M=7.2	30km (35km)
(株)松村組技術研究所 研究棟及び管理棟 ⁵⁾	研究棟：地上3階 管理棟：地上3階	兵庫県南部地震	V	1995年1月17日5時46分	M=7.2	30km (35km)
小金井社宅 免震建物・耐震建物 ⁵⁾	免震：地上3階 耐震：地上3階	浦賀水道地震	V	1992年2月2日4時4分	M=5.9	58km (110km)
東北大学免震実証建屋 免震建屋・在来建屋 ⁶⁾⁷⁾	免震：地上3階 在来：地上3階	福島県沖地震	IV	1987年2月6日22時16分	M=6.7	168km (171km)
(株)奥村組筑波研究所 管理棟 ⁶⁾	地上4階	茨城県南西部地震	IV	1987年6月30日18時17分	M=5.1	11km (56km)

示すように、WESTビル⁵⁾、(株)松村組技術研究所研究棟⁵⁾、小金井社宅⁵⁾、東北大学構内実験棟⁵⁾⁶⁾⁷⁾、(株)奥村組筑波研究所管理棟⁵⁾⁶⁾の以上5つである。

WESTビル⁵⁾は、延べ床面積が46,000m²を超える国内最大規模の免震建物(柱SRC造、はりS造6階建)であり、免震層を基礎と1階の間に設けている。こ

表-3 免震建物における地震動観測結果⁸⁾

地震名	建物名	地震観測位置	最大化速度 (gal) (カッコ内は倍率)		
			方向		
			東西(EW)	南北(NS)	上下(UD)
1995年1月17日 兵庫県南部地震 (神戸震度5)	WESTビル ⁵⁾	6階	103(0.34)	75(0.29)	377(1.77)
		1階	106(0.35)	57(0.22)	193(0.9)
		基礎	300(1.0)	263(1.0)	213(1.0)
1995年1月17日 兵庫県南部地震 (神戸震度5)	(株)松村組技術研究所 研究棟 ⁵⁾	屋上	273(1.03)	198(0.73)	334(1.44)
		1階	253(0.95)	148(0.54)	266(1.15)
		基礎	265(1.0)	272(1.0)	232(1.0)
1992年2月2日 震源：東京湾 (東京震度5)	小金井社宅 ⁵⁾	3階	24.51(0.45)	44.12(0.38)	—
		1階	24.11(0.42)	41.11(0.36)	24.69(1.25)
		基礎	57.46(1.0)	115.07(1.0)	20.24(1.0)
1987年2月6日 震源：福島県沖 (仙台震度4)	東北大学構内実験棟 ⁷⁾	4階	35.76(0.88)	31.84(0.71)	—
		1階	35.41(0.85)	27.51(0.62)	45.15(1.28)
		基礎	41(1.0)	45(1.0)	34.56(1.0)
1987年6月30日 震源：茨城県南西部 (柿岡震度4)	(株)奥村組筑波研究所 管理棟 ⁶⁾	屋上	25.8(0.43)	20.5(0.1)	38.8(1.08)
		3階	18.4(0.31)	12(0.06)	39.7(1.11)
		1階	29.4(0.50)	16.6(0.06)	42.1(1.17)
		基礎	59.3(1.0)	202.5(1.0)	35.9(1.0)

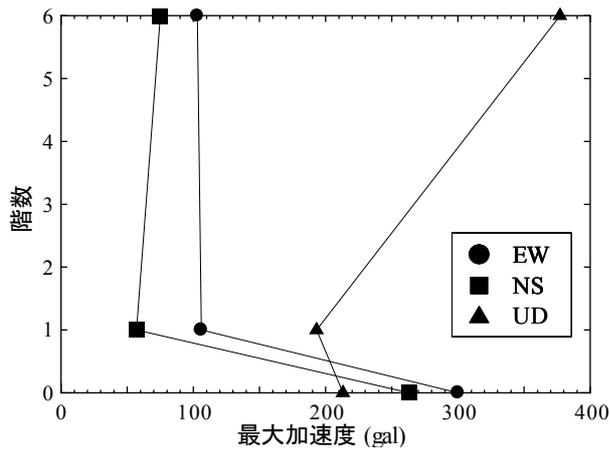


図-4(a) WESTビル

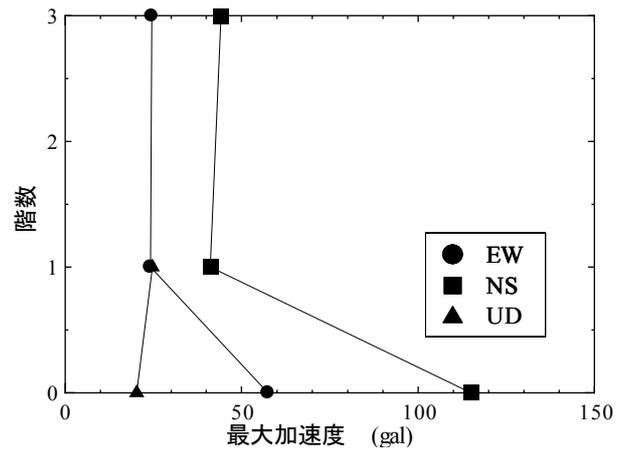


図-4(c) 小金井社宅

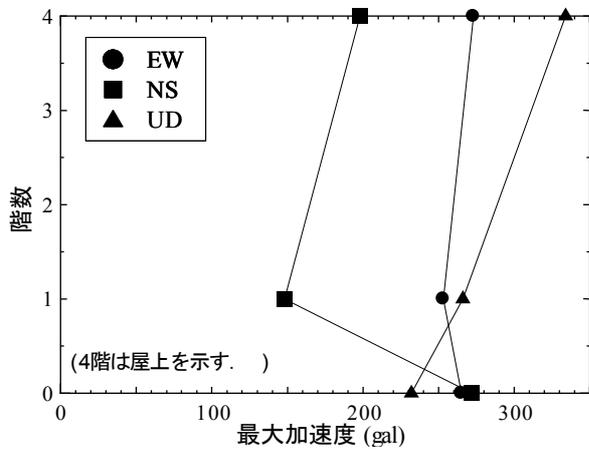


図-4(b) 松村組技術研究所研究棟

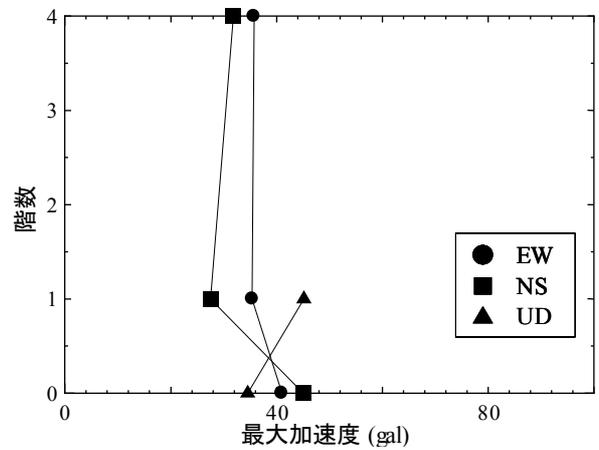


図-4(d) 東北大学構内実験棟

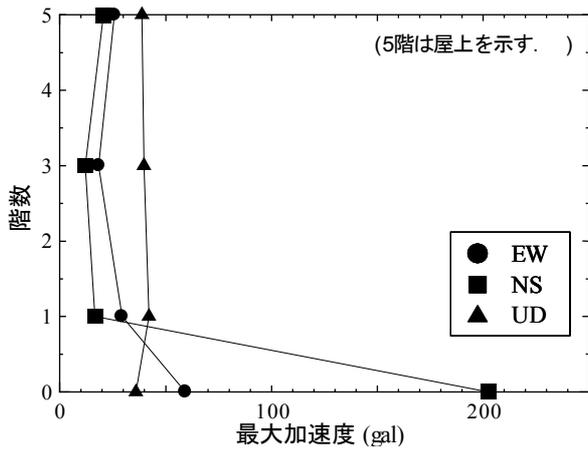


図-4(e) 奥村組筑波研究所管理棟

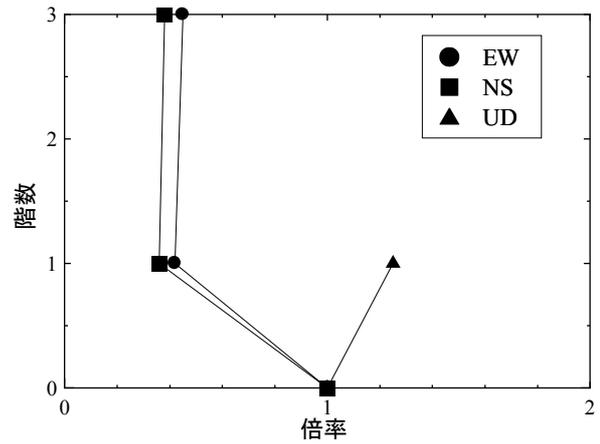


図-5(c) 小金井社宅

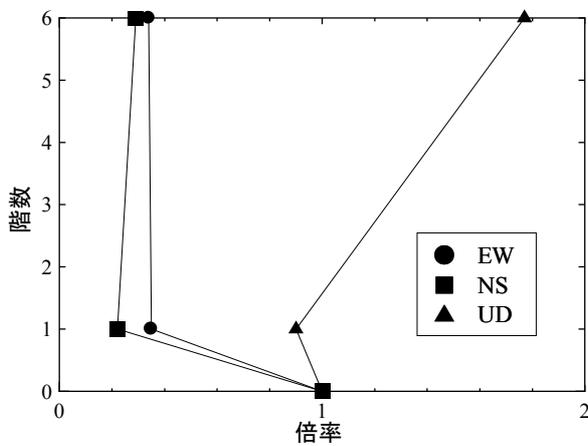


図-5(a) WESTビル

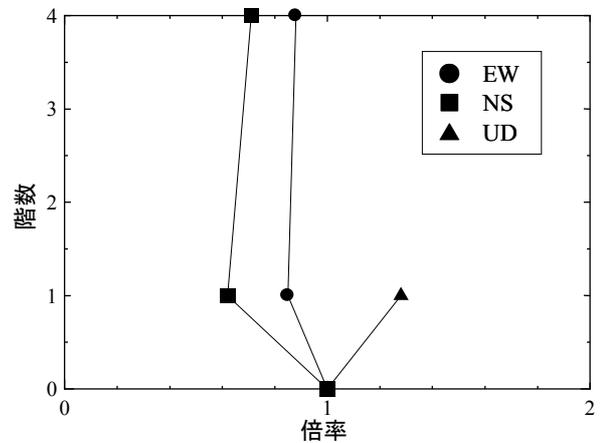


図-5(d) 東北大学構内実験棟

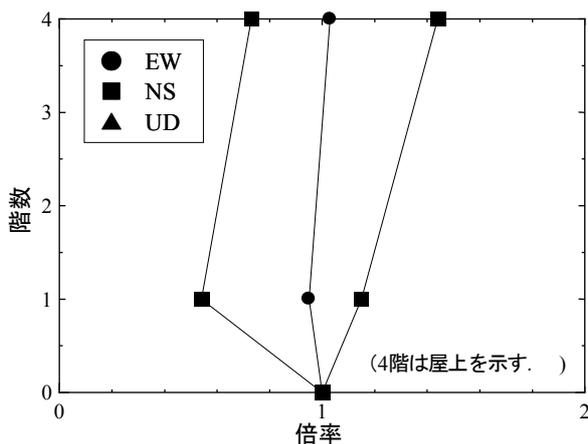


図-5(b) 松村組技術研究所研究棟

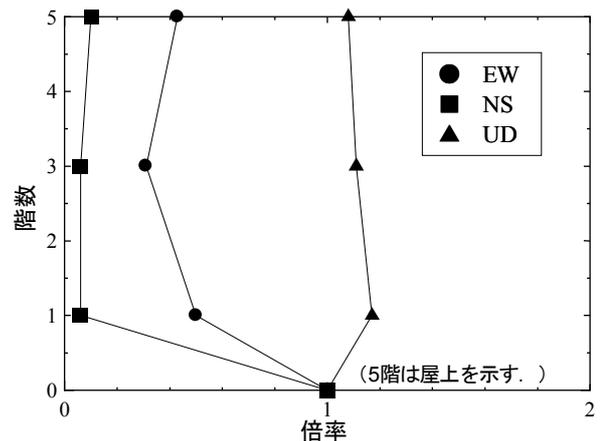


図-5(e) 奥村組筑波研究所管理棟

の建物では、基礎と1階と6階に地震計が設置されている。

次に、(株)松村組技術研究所研究棟⁵⁾は、震源の北東35kmに位置するこの建物は、免震建物である研究棟と耐震建物である管理棟が隣接している。免震装置は基礎と1階の間にあり、地震計は基礎

と1階に設置されている。

小金井社宅⁵⁾については、この場合も前記と同じく、免震建物と耐震建物が隣接している。免震装置は基礎と1階の間にあり、地震計は基礎と1階と3階に設置されている。

東北大学構内実験棟⁶⁾については、この実験棟は、

同一形状・規模の建物を、並べて2棟建設し、比較のために免震工法と在来工法によって建設されている。免震装置は基礎と1階の間、地震計は基礎と1階と4階に設置されている。

(株)奥村組筑波研究所管理棟⁵⁾については、この建物(図-3)は、RC造4階建、軒高13.75m、平面形は一部階段室が突出しているが、長辺(東西)方向が20.4m、短辺(南北)方向が15.0mの長方形である。短辺方向は両側面にほぼ均質に耐震壁が設置され、壁量も比較的多い剛性の高い架構である。長辺方向は用途上の制約から壁が少なく、耐震壁も偏在しているが、柱幅を広げて偏心を少なくするように配慮されている。この建物では基礎地盤と1階床の間に免震装置が装着され、1階から上部の部分が免震装置によって支持されている。ここで用いられている免震装置は固有周期伸長機構としての積層ゴムと減衰機構としての弾塑性ダンパーを組み合わせたものである。地震計は基礎と1階と3階と屋上にある。

(2) 各免震建物とその増幅倍率と最大加速度

表-2の地震で観測された加速度については表-3に示す⁸⁾。WESTビルと(株)松村組技術研究所研究棟は兵庫県南部地震で観測されたものであり、2つとも震度5の地域であった。小金井社宅は浦賀水道を震源とするもので、震度5の地域であった。東北大学構内実験棟は福島県沖地震で、震度4の地域であった。(株)奥村組筑波研究所管理棟は茨城県南西部地震で震度4の地域であった。

a) 免震建物における最大加速度の高さ方向分布

図-4(a)～(e)に基礎免震建物における加速度の高さ方向分布を示す⁸⁾。基礎部では5つの建物で鉛直動成分(UD)が水平動成分(EW, NS)より小さいが、免震基礎の上の1階から上方ではその関係が逆転して鉛直動成分(UD)が水平動成分(EW, NS)より大きくなっており、しかも水平動成分が減衰して、鉛直動成分が増幅している⁸⁾。

b) 基礎免震建物の各階における最大加速度の基礎の最大加速度に対する倍率

各建物の基礎部分とそれぞれの階の最大加速度EW成分、NS成分、UD成分の大きさの比較を行うため、倍率を求める。この倍率は各階の最大加速度を基礎の最大加速度で除したものであり、表-3のカッコ内と図-5(a)～(c)に示す。5つの建物に共通して次のことがいえる⁸⁾。

松村組技術研究所研究棟屋上のEW成分を除いて、いずれの建物でも1階から上方では水平動成分(EW, NS)が1以下に減衰している。また、WESTビルの1階を除いていずれの建物でも鉛直動成分(UD)が1以上に増幅している。

なお、いずれの建物でも1階より上の階での倍率はNS成分が最も小さく、次にEW成分が大きく、UD成分が最も大きい。この傾向は建物の剛性の分布や地震の特性などに関係するのかもしれない。

WESTビルでは、基礎でUD成分の最大加速度が一番小さい値を示している。しかし、倍率をみると6階ではUD成分の倍率がかなり大きな値を示して

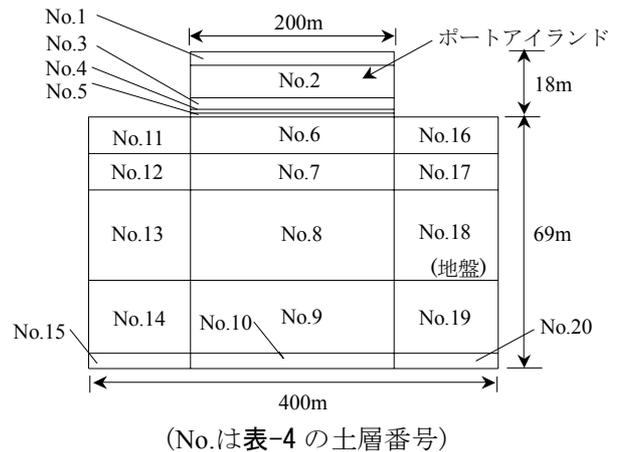


図-6 解析モデル

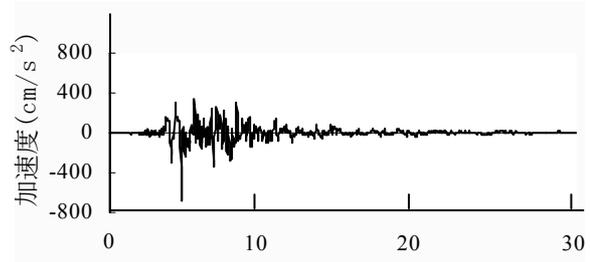


図-7(a) ポートアイランド記録(NS成分)¹⁰⁾

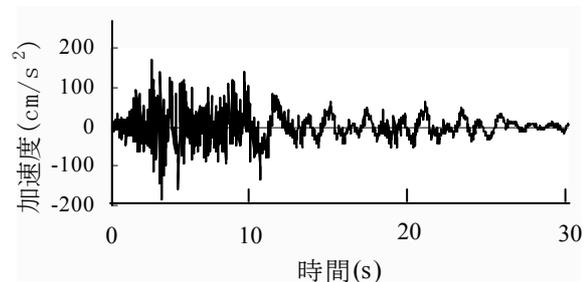


図-7(b) ポートアイランド記録(UD成分)¹⁰⁾

いる。(株)松村組技術研究所研究棟では、基礎ではUD成分の加速度が最も小さいが、1階と屋上ではともにUD成分の倍率が大きな値を示している。小金井社宅では、全階でNS成分の加速度が大きい倍率ではUD成分が最も大きな値を示している。東北大学構内実験棟では、基礎でNS成分の加速度が最も大きい、上階ではUD成分の倍率が最も大きな値を示している。(株)奥村組筑波研究所管理棟では、基礎でUD成分の加速度が一番小さいが倍率は1階以上の階でUD成分が水平動成分より大きな値を示している。

(3) 基礎免震建物における地震動のまとめ

以上に述べてきたように、免震工法建物では免震装置がある基礎を境にして上方に向かって鉛直動成

表-4 解析定数(No.は図-2の土層番号, 物性値は文献3,11)の修正値

No.	土層	ポアソン比	単位体積重量	初期せん断弾性係数	初期減衰定数	材料特性曲線	厚さ
1	埋立土層-1(砂礫)	0.480	2.0(t/m ³)	19.6(MPa)	5.0(%)	SAND40kPa	4m
2	埋立土層-2(砂礫)	0.495	2.0	57.8	5.0	SAND150kPa	9m
3	埋立土層-3(礫混じり砂)	0.490	2.0	88	5.0	SAND200kPa	3m
4	埋立土層-4(粘性土層)	0.490	1.6	3	5.0	CLAY200kPa	1m
5	埋立土層-5(礫混じり砂)	0.490	2.0	88	5.0	SAND200kPa	1m
6	沖積粘土層(沖積粘土)	0.488	1.4	45	5.0	CLAY250kPa	10m
7	洪積粘性土・砂質土層(砂・シルト)	0.482	1.8	108	5.0	S-C300kPa	10m
8	第一洪積砂礫層(礫混じり砂・砂)	0.477	2.0	216	5.0	SAND400kPa	25m
9	洪積粘土層(洪積粘土)	0.482	1.8	166	5.0	CLAY600kPa	20m
10	第二洪積砂礫層(礫混じり砂)	0.487	2.0	205	5.0	SAND700kPa	4m
11	沖積粘土層II(沖積粘土)	0.488	1.4	45	5.0	CLAY20kPa	10m
12	洪積粘性土II・砂質土層(砂・シルト)	0.482	1.8	108	5.0	S-C100kPa	10m
13	第一洪積砂礫層II(礫混じり砂・砂)	0.477	2.0	216	5.0	SAND300kPa	25m
14	洪積粘土層II(洪積粘土)	0.482	1.8	166	5.0	CLAY400kPa	20m
15	第二洪積砂礫層II(礫混じり砂)	0.487	2.0	205	5.0	SAND650kPa	4m
16	沖積粘土層III(沖積粘土)	0.488	1.4	45	5.0	CLAY20kPa	10m
17	洪積粘性土・砂質土層III(砂・シルト)	0.482	1.8	108	5.0	S-C100kPa	10m
18	第一洪積砂礫層III(礫混じり砂・砂)	0.477	2.0	216	5.0	SAND300kPa	25m
19	洪積粘土層III(洪積粘土)	0.482	1.8	166	5.0	CLAY400kPa	20m
20	第二洪積砂礫層III(礫混じり砂)	0.487	2.0	205	5.0	SAND650kPa	4m

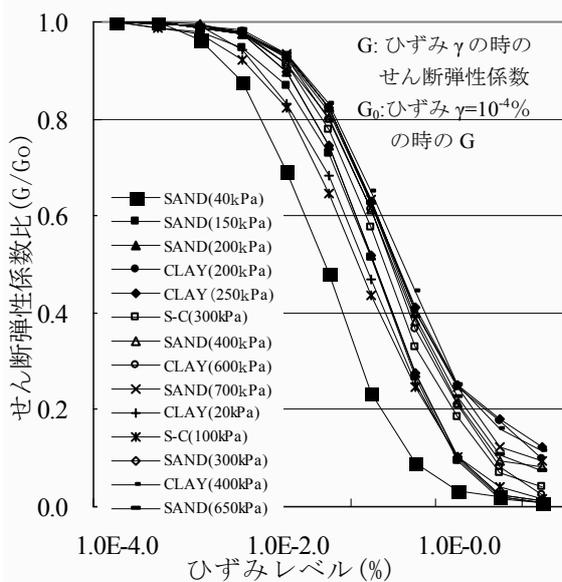


図-8 せん断弾性係数比¹¹⁾

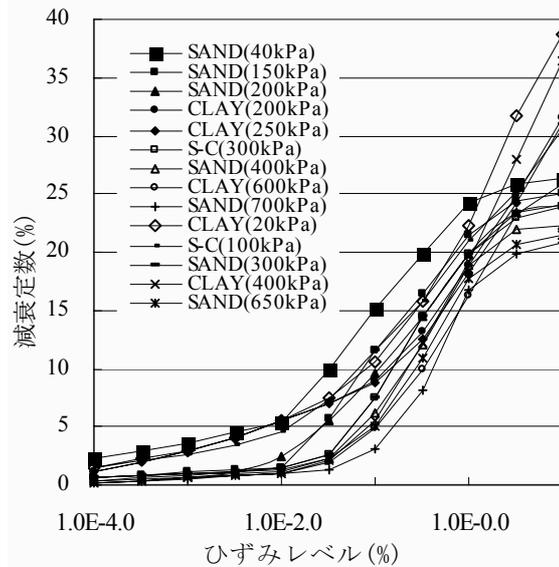


図-9 減衰定数¹¹⁾

分が大きくなるとともに、水平動成分は小さくなる。ポートアイランドの場合は軟弱粘性土層より上方では鉛直動成分が大きくなり、水平動成分が小さくなっている。基礎免震建物の地震動伝播挙動を参考にすると、ポートアイランドでは軟弱粘性土層が免震装置の役割を果たしたことが推測される。従って、ポートアイランドで観測された加速度の増幅特性は各基礎免震建物の増幅特性と類似であると考えられる⁸⁾。

4. ポートアイランドの地震応答解析

これまでにとまとめたポートアイランドで観測された地震動について、実際にポートアイランドで観測された実地震波形を入力し地震応答解析を行い、基礎免震工法建物の地震動伝播との関連性について検討する。

(1) 地震応答解析の概要

今回の地震応答解析は micro FLUSH⁹⁾を用い、図-6のような左右対称の解析モデルを作成して解析を

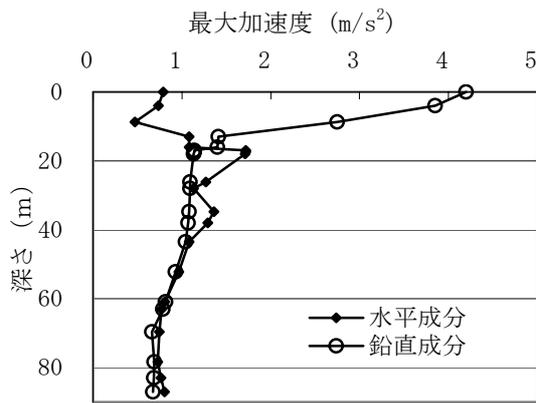


図-10 100cm/s²入力時の最大加速度

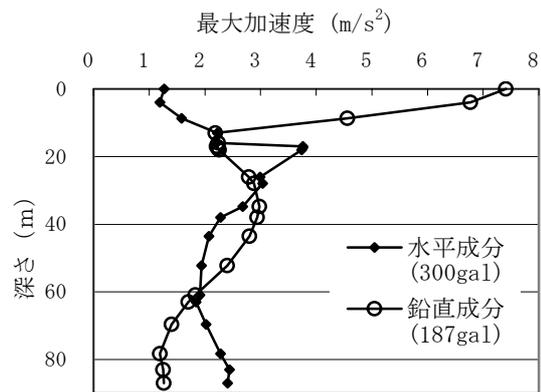


図-12 187cm/s²及び300 cm/s²入力時の最大加速度

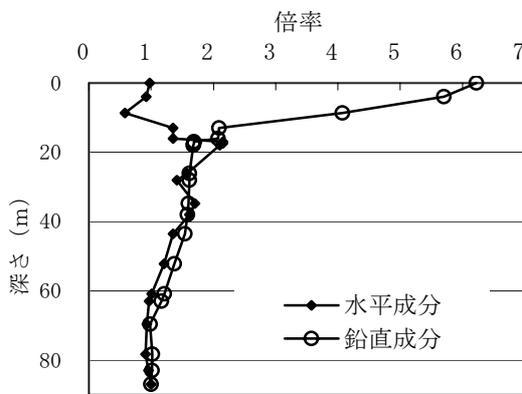


図-11 100cm/s²入力時の倍率

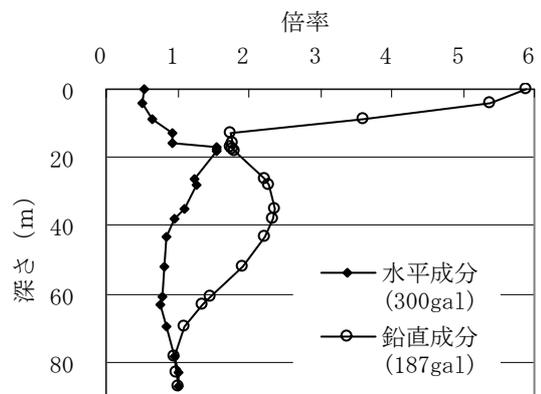


図-13 187cm/s²及び300 cm/s²入力時の倍率

行った。解析に用いた入力地震波はポートアイランドで実際に観測された G.L.-83m 地点の NS 成分と UD 成分の波形(図-7(a), 図-7(b))¹⁰⁾であり、最大値を水平方向加振時に 100cm/s² および 300 cm/s² とし、鉛直方向加振時に 100cm/s² および 187cm/s²(観測値)として解析モデル底面から入力した。対象とした解析モデルの地盤特性は表-4 と図-8, 図-9 に示す。但し、この物性値は文献 3), 11) を修正して使用した。

(2) 地震応答解析結果¹²⁾

図-10 と 図-11 は 100 cm/s² 入力時の結果であり、それぞれ水平動成分(NS 成分波形による水平方向加振時)と鉛直動成分(UD 成分波形による鉛直方向加振時)の最大加速度と、モデル底面の加速度を 1.0 としたときの倍率である。ここで、水平成分加速度は G.L.-16m 付近から上方に向かって大きく減衰(地表面で約 0.98 倍)、鉛直成分加速度は G.L.-16m 付近より上方では増幅(地表面で約 6.2 倍)している。図-12 と 図-13 は 300 cm/s²(水平方向加振)入力時と 187 cm/s²(鉛直方向加振)入力時の結果である。水平成分加速度は G.L.-16m 付近から上方に向かって大きく減衰(地表面で約 0.5 倍)し、鉛直成分加速度は G.L.-

16m 付近まではほぼ同じような大きさであるが、それより上方では増幅(地表面で約 5.8 倍)している。

なお、せん断ひずみは図-10 と 図-12 の両解析において G.L.-16m 付近で局部的に大きい値を示すとともに、その水平方向加振時と鉛直方向加振時の値には約 2 桁の違いがあり後者の方が小さい。

5. 結論

以上に述べたことを次にまとめる。

- 1) 免震工法建物では免震装置がある基礎を境にして上方に向かって鉛直動成分が大きくなるとともに、水平動成分は小さくなる。ポートアイランドの場合は軟弱粘性土層より上方では鉛直動成分が大きくなり、水平動成分が小さくなっている。基礎免震建物の地震動伝播挙動を参考にすると、ポートアイランドでは軟弱粘性土層が免震装置の役割を果たしたことが推測される。従って、ポートアイランドで観測された加速度の増幅特性は各基礎免震建物の増幅特性と類似であると考えられる。
- 2) ポートアイランドの地震動伝播挙動の解析を行った結果、軟弱粘性土層を境界にして、鉛直動成分

が増幅し水平動成分が減衰することが分った。また、入力加速度が大きくなるとそれに伴って地盤の歪非線形性が大きく生じて、水平成分の倍率及び鉛直成分の倍率は小さくなることが分った。よって、兵庫県南部地震の際に軟弱粘性土層が免震工法建物にある免震装置と同等の作用をもたらしたと考えられる。

3) ポートアイランドと基礎免震建物の地震動挙動の類似性が発生したのは、ポートアイランドの砂層と粘土層からなる地盤系が、水平震動に対しては粘土層が極軟弱化して長周期化するとともに、鉛直震動に対しては粘土層が薄いため剛性が比較的大きく短周期状態にあり、粘土層の地震後の剛性が免震建物の免震基礎の小さいせん断剛性と鉛直方向の大きい剛性に類似になったためではないかと推察される。

6. あとがき

地震応答解析によってポートアイランドで液化化が発生して水平震動が減衰し鉛直震動が増大する地震動伝播現象が調べられているが、今回基礎免震建物でも同様の現象が生じているので、比較的 N 値の大きい砂層の下の薄い粘土層が基礎免震工法の免震装置に相当したのではないかと考えて地震応答解析を行ったところ、実際と同様に地震動伝播現象がみられた。しかし、実際に観測された地震動の倍率よりも大きいので、より正確な物性値で解析する必要があると考えられるし、今回の1つの解析結果だけで断定できないので、今後検討事例を増やすとともに液化化の影響との関係を調べる予定である。

ポートアイランドと基礎免震建物との間に類似性が再確認できたならば、今回解析モデルとしたような地盤構造のところでは鉛直震動が増大することがあるので、それに適した工法（例えば地盤改良工法等）の開発が必要になると考えられる。また、これまでは主に水平震動に対する対策が考えられてきたが、地盤が免震装置の役割をもつなら、地盤そのものを使って地震時の水平震動を抑えることが出来る

筈であり、その地盤につくる構造物には鉛直震動対策をするだけで今までよりも大幅に地震被害を小さくすることができると考えられる。

謝辞：以上の調査でお世話になった本学卒業生の佐藤弦也君と貴重な資料を提供して頂いた(株)奥村組の関係者他の方々に厚く御礼申し上げます。また、今回の解析を行うに当ってお世話になった(株)地震工学研究所に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 那須誠:地震被害への地盤の影響と被害機構の推定(その2,地震動と盛土),前橋工科大学研究紀要,第3号,pp.9-16,2000.3.
- 2) 塚本登士,中島俊,山本正人,村田芳信:兵庫県南部地震における埋立地の液化化現象と S 波速度を用いた液化化強度の評価例,応用地質技術年報,兵庫県南部地震特集号,pp.215-235,1997.10.
- 3) 鳥井原誠,伊藤浩二:兵庫県南部地震で被災した埋立地の地盤特性と液化化,大林組技術研究所報 特別号,阪神・淡路大震災 調査・分析/対応技術,pp.25-34,1996.
- 4) 運輸省港湾技術研究所編:港湾技研資料,1995 年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告,pp.104,1997.3.
- 5) 日本免震構造協会編:免震構造入門,pp.115-139, 1995.
- 6) (財)電力中央研究所(松田泰治,塩尻弘雄,青柳栄,沢田義博),(株)奥村組(原田治,川井伸泰,大塚将,安倍勇)編:免震ビルの信頼性実証に関する研究(その2)-地震観測および応答解析結果-(株)奥村組原子力室,TECHNICAL REPORT No.101, 1988.6.
- 7) 大崎順彦監修,清水建設免震グループ編:わかりやすい免震建築,pp.56-62,pp.149-151,1990.
- 8) 那須誠,三村八一:基礎免震建物の地震動伝播状況-水平成分の減衰と上下成分の増幅-,J-RAIL2003,pp.445-448,2003.12.
- 9) (株)地震工学研究所編:micro Flushマニュアル,1997.9.
- 10) (財)震災予防協会編:強震動アレー観測,pp.1-91,1998.3.
- 11) 那須誠,羽矢洋:鉄道線路沿いの土の動的性質-動的変形定数と液化化強度-,鉄道総研報告,pp.45-51,1988.1.
- 12) 那須誠,三村八一:ポートアイランドの地震動の水平成分減衰と鉛直成分増幅についての解析,第39回地盤工学研究発表会発表講演集,No.1010,pp.2017-2018,2004.7.

(2005年3月15日受付)

A consideration of effect of ground upon propagating behavior of seismic motion in the Port island during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake.

Makoto Nasu, Yaichi Mimura

The attenuation of horizontal component and the amplification of vertical component of the seismic motion had been observed in the vicinity of the ground surface of the Port island during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake. This behavior in the Port island is similar to the behavior of seismic motion propagation in buildings with a seismic base isolation system. First the observed seismic records in the buildings have been summarized, and next the seismic response analyses of the ground in the Port Island have been carried out. As a result, it has been presumed that that a thin and very soft clay layer within the ground of the Port island had demonstrated the same effect as a seismic base isolation device in the building during the Hyogoken-nambu earthquake.