

免震構造物の水平・上下同時入力時の応答特性に関する検討

—— (兵庫県南部地震観測波による応答評価) ——

林 章 二
(技術研究所)
田 村 和 夫
(和泉研究室)
横 田 治 彦
(技術研究所)

§1. はじめに

免震建物は、日本国内においてこれまで約80棟が建設され、数多くの中小地震により観測記録が得られ、その有効性が確認されている¹⁾。また、アメリカでは、1994年のノースリッジ地震において、ロスアンゼルス市中心部にあるUSC hospitalの免震建物が非常に大きな効果を発揮したことが報告されている²⁾。また、今回の兵庫県南部地震では、神戸市北区に立地している2棟の免震建物が、強震を経験しており、その免震効果が顕著に発揮されたと報告されている^{3),4)}。しかしながら、最も被害が大きかった震度7の地域には、免震建物は存在しておらず、この地域での免震建物の応答の記録は得られていない。

また、今回の地震では大きな上下動観測記録が報告されており、上下動が構造物へ与える影響について議論がなされている。免震建物の上下方向応答については、これまで在来構法による建物と同様の応答特性を示すとされ、詳細な検討を行った例は少ない。

本論文では、兵庫県南部地震において記録された各地の観測波を用い、免震建物の水平、上下同時入力時の応答を検討した。特に、震源近傍の地震動を記録した神戸海洋気象台、および大阪平野の堆積層で発生した表面波により、長周期成分を含むと推定される大阪での観測波に着目して検討を行った。合わせて、これまで広く用いられている既往の地震波(El Centro等)についても同様な検討を行い、今回の地震で得られた観測波の特徴を免震建物の応答という観点から評価することとした。特に、上下方向応答が大きな影響を与えるとされる、免震装置の軸力変動に着目してその応答を評価した。また、軸力変動を評価する上で、水平、上下方向応答の同時性についても検討を行った。

§2. 免震建物モデルの応答の検討

免震構法は免震装置により水平方向固有周期を長くし、水平方向の加速度応答を低減する構法であることから、上部建屋自体の固有周期が短い低層建物への適用が数多く行われてきた。そのため、免震構造物の応答を評価する上で、水平方向の応答加速度の低減効果が着目され、検証されてきた。また、免震装置に働く軸力変動について特に大きな問題となることはなかった。

一方、免震装置の改良の観点から、装置として用いられる積層ゴムのゴム材料に低弾性なものが開発され、これまでより低剛性の免震装置が製品化されてきている。また、免震装置をより高面圧(装置が支持する単位面積当り荷重)で用いることにより、免震構造の長周期化を図るようになってきた。そのため、高層建物への適用が可能となってきている。しかし、それに伴い免震装置の上下伸縮によるロッキング振動、上下地震動による上下応答の影響を含め、免震装置に作用する変動軸力について検討する必要がでてきた。本章では、実際に想定される免震建物をモデル化し、兵庫県南部地震における観測波を含め、地震時応答の検討を行った。

2.1 モデル建物の諸元

兵庫県南部地震以後、マンションへの免震構造適用のニーズが高まっている。検討用建物モデルは、高層マンションを想定したものである。建物を高層化すると、免震装置に働く軸力変動が問題となる可能性がでてくる。建屋は一般のマンションを想定してスパンを10mとし、高さをアスペクト比が約2および2.8になるように設定し、アスペクト比の違いにより軸力応答に与える影響を検討することとした。

諸元	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
階高(cm)	280			
階数	10	10	7	7
総高さ(cm)	2800	2800	1960	1960
スパン長(cm)	1000	1000	1000	1000
アスペクト比	2.8	2.8	1.96	1.96
免震層高さ(cm)	100	100	100	100
屋上階重量(tf)	80	重量は、支配面積		
基準階重量(tf)	72	6m×10mより算定		
耐震壁厚(cm)	20			
総重量(tf)	800	800	584	584
免震装置 設定上下振動数(Hz)	15	10	15	10

表-1 建屋モデル諸元

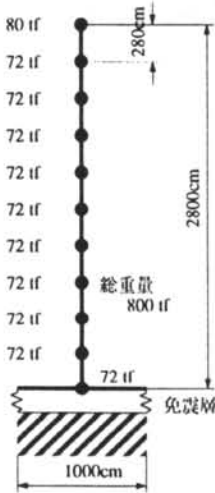


図-1 免震建屋モデル (10層タイプ)

設定した建物モデル諸元を表-1に示す。また、解析モデルを図-1に示す。

上部建屋については多質点系の曲げせん断モデルとした。建屋の減衰は基礎を固定とした場合の1次の固有振動数に対して、水平、上下方向とも2%の粘性減衰を仮定した。免震装置については各設定モデルに対して、上部建屋を剛体とした時の水平方向固有周期が2.5秒、上下方向の固有振動数が10, 15Hzになるように、それぞれの方向の剛性を設定した。装置の減衰は粘性減衰とし、減衰定数は水平方向が15%、上下方向が3%とした。

2.2 検討に用いた観測波

本論文で検討に用いた地震動観測波の一覧を表-2に示す。各地の気象台で観測された記録を以後JMAと示し、関西地震観測研究協議会で観測され

地震波(地点)	最大加速度(cm/s ²)		
	NS	EW	UD
気象台観測記録			
福井	33.0	41.5	10.1
彦根	136.8	146.9	39.1
神戸	818.0	617.4	332.3
舞鶴	66.9	52.2	39.4
岡山	77.3	59.1	36.0
大阪	80.9	66.0	64.5
鳥取	76.8	74.2	14.7
関西地震観測研究協議会記録			
阿倍野	216.5	226.3	136.1
千早	90.2	108.5	73.6
福島	180.8	210.8	194.9
森河内	209.9	124.4	159.0
堺	149.5	124.2	100.6
忠岡	290.1	190.5	136.6
弥栄	154.6	144.4	127.0
既往観測波			
El Centro	341.7	210.1	206.3
Taft	152.7	175.9	102.9
Hachinohe	224.4	183.6	114.2

表-2 検討観測波一覧

た記録を関震協と示す。本章では、観測波の中で比較的最大加速度が大きい、JMA(神戸、大阪、彦根)、関震協(福島、堺、忠岡)を用いた。また、代表的な既往観測波についても検討した。入力には水平1方向単独入力、および水平1方向、上下方向同時入力について実施した。

2.3 検討結果

各観測波による応答結果を表-3に示す。1階での水平変位は、アスペクト比および免震装置上下方向の剛性による違いはほとんど認められない。最も水平応答変位が大きいのは、神戸(JMA)によるもので約28cmである。この値は一般的な免震建物の免震装置(積層ゴム)の許容水平変位に十分収まる結果である。これに対してEl Centro(NS)で17cm、Hachinohe(NS)で22cmであり、また、装置特性が線形と仮定した場合、最大速度振幅50cm/s相当入力に対して、El Centroで26.5cm、Hachinoheで32.4cmであることから、神戸による結果と大きな差はない。

応答加速度については、神戸の場合が水平、上下両方向とも大きな値となったが、上下方向応答加速度については、福島の場合を入力した場合が装置上下振動数10Hz、アスペクト比2.0の場合で655cm/s²と最も大きな値となった。

各観測波の水平方向単独入力、および水平、上下

建屋モデル	応答値	地震波								
		JMA			関震協			既往波		
		彦根	神戸	大阪	福島	堺	忠岡	El Centro	Taft	八戸
装置上下振動数15Hz アスペクト比2.8	1F水平加速度(cm/s ²)	27.3	209.0	50.7	102.9	67.4	82.5	122.3	52.2	143.9
	1F上下加速度(cm/s ²)	41.9	458.2	88.3	300.1	130.3	205.2	253.7	113.7	121.5
	1F水平変位(cm)	3.9	28.3	7.8	14.5	9.5	9.7	17.7	6.6	22.2
装置上下振動数15Hz アスペクト比2.0	1F水平加速度(cm/s ²)	27.7	188.4	53.7	99.2	65.6	69.4	123.1	51.4	146.8
	1F上下加速度(cm/s ²)	42.5	506.7	108.0	320.3	148.9	245.1	451.7	119.9	122.2
	1F水平変位(cm)	4.0	28.5	7.7	14.6	9.5	9.7	17.9	6.6	22.0
装置上下振動数10Hz アスペクト比2.8	1F水平加速度(cm/s ²)	28.3	231.0	52.8	104.0	73.7	85.6	119.5	46.8	141.0
	1F上下加速度(cm/s ²)	59.1	576.8	83.9	296.7	159.5	264.5	346.5	174.4	135.3
	1F水平変位(cm)	3.9	28.2	7.8	14.5	9.5	9.7	17.7	6.5	22.2
装置上下振動数10Hz アスペクト比2.0	1F水平加速度(cm/s ²)	27.8	182.6	52.2	97.6	67.2	81.2	133.3	55.6	145.9
	1F上下加速度(cm/s ²)	49.5	635.2	166.2	655.1	232.7	325.9	538.5	178.3	136.1
	1F水平変位(cm)	4.0	28.5	7.7	14.6	9.5	9.7	17.8	6.5	22.1

表-3 免震建屋モデル応答値

両方向同時入力時の免震装置に生じた上下方向最大荷重を自重を除いた値（以後、軸力変動率と示す）を装置上下方向振動数15Hz,アスペクト比2.0,2.8について図-2に、上下方向振動数10Hzの場合を図-3にそれぞれ示す。

水平方向単独入力による軸力変動率は、免震構造物の1次振動モードが卓越すると見なせば、建屋の水平応答加速度にほぼ比例すると考えられる。アスペクト比2.8の場合、神戸の場合で変動率は60%、El Centroで37%、Hachinoheで43%で、この3種類の観測波において水平動が軸力変動に与える影響が大きく、特に神戸の場合が際だって大きいことが分かる。一方、水平、上下両方向同時に入力した場合の軸力変動率は水平方向単独入力に比べ増加するが、入力波の違いにより増加の程度が大きく異なる。

軸力変動率は神戸、福島での観測波に対する結果が大きく、免震装置上下方向振動数10Hz、アスペクト比2.8の場合には、軸力変動率が1を上回る結果となった。これは、免震装置に引張力が働く可能性があることを示している。逆に上下方向応答加速度は大きいものの軸力変動が小さい結果も得られており、特にEl Centro, 忠岡（関震協）の場合にその傾向が見られる。これら結果の軸力変動波形の一例を図-4に示す。El Centro, 忠岡の結果では、水平方向単独入力と水平、上下両方向同時入力時の免震装置の軸力変動の波形を比べた場合、装置軸力変動最大値が生じる時刻が異なっており、上下方向の応答加速度が軸力変動に大きな影響を与えていることが分かる。

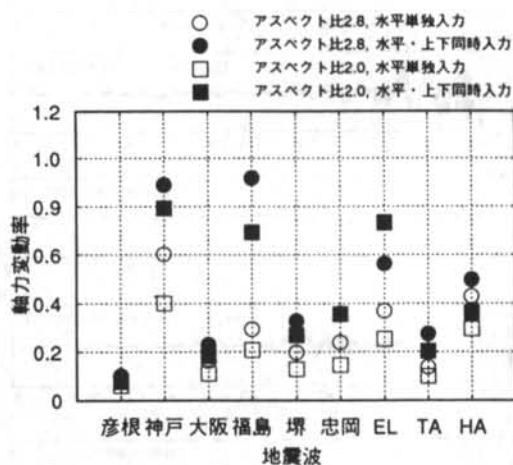


図-2 軸力変動率と地震波の関係(装置上下振動数15Hz)

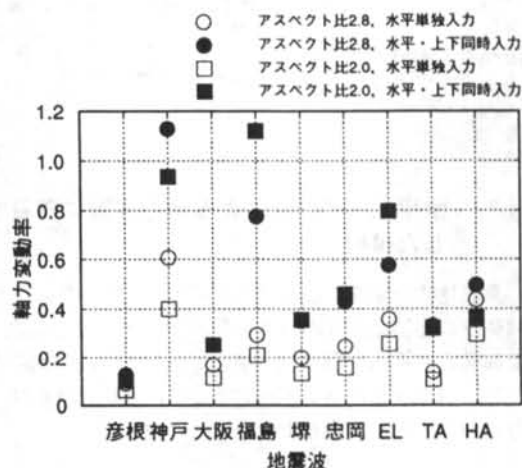


図-3 軸力変動率と地震波の関係(装置上下振動数10Hz)

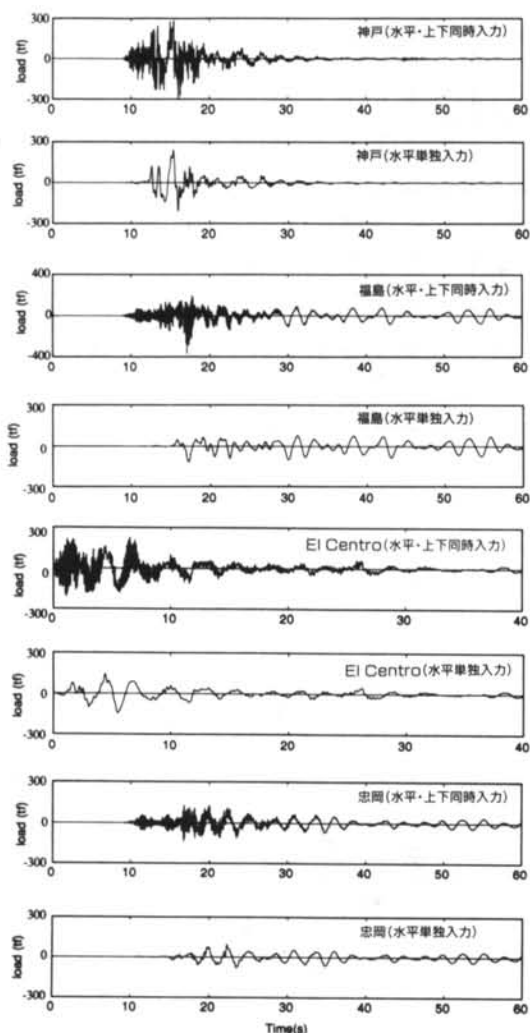


図-4 免震装置軸力変動
(アスペクト比2.0, 装置上下振動数15Hz)

§ 3. 水平・上下応答による軸力変動に着目した検討

免震建物の応答を評価するうえで、一般的に、上部構造の応答をほぼ剛体として評価できる。そこで、上部構造を単純な剛体モデルとし、上下方向振動数とアスペクト比をパラメータとして、各地震波が軸力変動に与える影響をより一般的に検討した。

3.1 軸力変動に関する検討

水平変形に伴うロッキング振動によって生じる軸

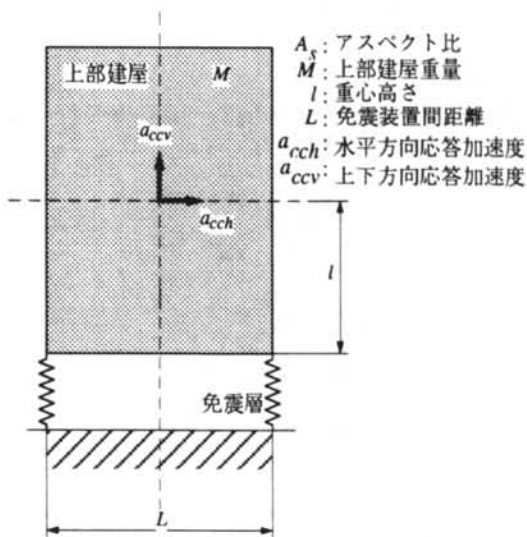


図-5 建屋剛体モデル

力変動を、上部構造がほぼ剛体として振動すると仮定して、図-5に示すモデルを設定し、一質点モデルの応答から、水平方向応答加速度とアスペクト比との関係から、装置部に働く軸力を以下の式に従い算定した。また、上下方向応答加速度によって生じる軸力を算定し、各方向の応答加速度により生じる変動軸力の和により、両方向に同時入力した場合の変動軸力を求めた。

水平方向応答加速度により免震装置に生じる変動軸力は

$$n_h = a_{cch} \cdot \frac{M}{g} \cdot \frac{A_s}{2} \dots\dots\dots(1)$$

上下方向応答加速度により免震装置に生じる変動軸力は

$$n_v = a_{ccv} \cdot \frac{M}{g} \cdot \frac{1}{2} \dots\dots\dots(2)$$

水平、上下両方向の応答加速度により免震装置に生じる変動軸力は

(1)+(2)式で表され、(3)式となる。

$$n_t = a_{cch} \cdot \frac{M}{g} \cdot \frac{A_s}{2} + a_{ccv} \cdot \frac{M}{g} \cdot \frac{1}{2} \dots\dots\dots(3)$$

また、変動軸力の自重に対する比率(軸力変動率)は下式で表される。

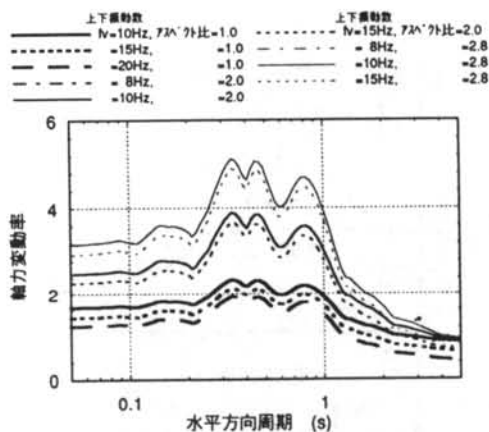


図-6 軸力変動率と水平周期の関係(神戸海洋気象台)

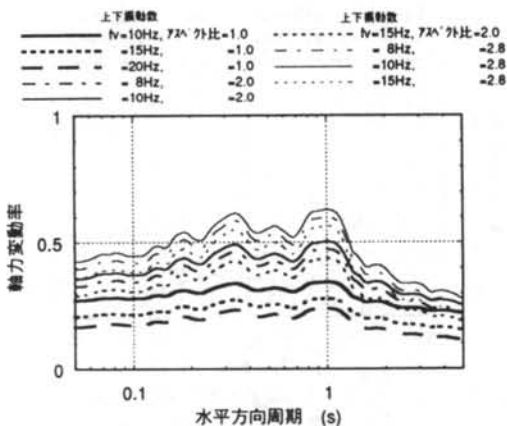


図-7 軸力変動率と水平周期の関係(大阪)

$$\mu_t = \frac{n_t}{M} = \frac{2}{a_{ch} \cdot A_s + a_{cv}} \dots\dots\dots(4)$$

- 上式中での記号は以下のとおりである。
- As: アスペクト比 (建物縦横比, $\frac{2l}{L}$)
 - g: 重力加速度
 - M: 上部建屋重量
 - l: 重心高さ
 - L: 免震装置間距離
 - a_{ch} : 水平方向応答加速度
 - a_{cv} : 上下方向応答加速度

3.2 水平方向周期と軸力変動率との関係

免震装置のモデルは、上下方向の固有振動数を

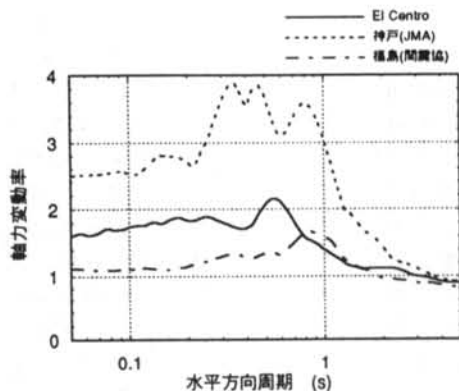


図-8 軸力変動率と水平周期の関係 (El Centro, 神戸, 福島) アスペクト比2.0, 上下方向振動数10Hz

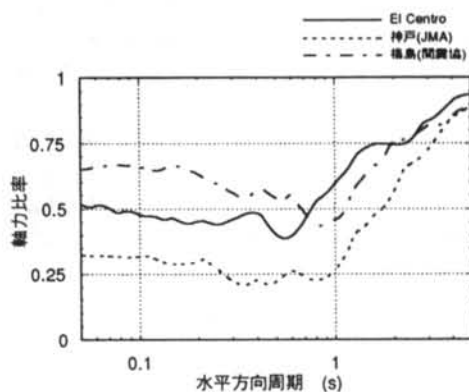


図-9 軸力比率と水平周期の関係 (El Centro, 神戸, 福島) アスペクト比2.0, 上下方向振動数10Hz

10,15,20Hzに設定し、水平方向には減衰定数15%、上下方向には5%の粘性減衰を付与した。

図-6, 7に建屋アスペクト比の違いによる軸力変動率と建屋水平方向周期との関係を、神戸、大阪(JMA)の記録について示す。水平方向周期1秒以上では、アスペクト比による軸力変動率に与える影響は小さくなっている。この傾向は地震波による差はなく、免震構造の周期領域である、2秒以上の領域で特にその傾向が顕著である。

アスペクト比が小さいほど軸力変動率は当然小さくなるが、長周期領域においては上下方向固有振動数との関係で、アスペクト比が小さい場合においても、大きい場合に比べ軸力変動率が大きくなることもある。特に、神戸での記録の場合、アスペクト比1.0でも装置に引張が生じる可能性を示している。

図-8に上下方向固有振動数10Hz,アスペクト比

2.0の場合の3種類の地震動観測波 (El Centro, 神戸 (JMA), 福島 (関震協)) に対する結果を示す。水平方向周期2秒以下の範囲では軸力変動率は入力地震動の種類により大きく異なっている。また、免震構造の周期領域 (2~3t) で軸力変動率が1.0を超えており引張力が生じる可能性を示している。図-9に、上記の場合の鉛直加速度による変動軸力の、総変動軸力に対する比率と水平方向周期の関係を示す。周期2秒以上の領域においては、上下方向応答加速度による軸力変動が各観測波とも0.5を上回り、上下動の影響が大きくなることを示している。

比較の入力加速度が小さい、4種類の観測波 (Taft, Hachinohe, 大阪 (JMA), 堺 (関震協)) について検討した結果を図-10に示す。各観測波とも、免震構造周期領域における軸力変動率は小さく、0.5以下であり免震装置に引張力が生じていない。

以上の検討結果から、上下方向の固有振動数を一定とした場合、水平方向周期が長くなるほど軸力変動率は小さくなる。

長周期領域においては、水平方向応答加速度の低下に伴い軸力変動に占める上下動の影響が大きくなる。長周期領域における、上下動による軸力変動の、全体の軸力変動に占める比率は、入力動の種類により大きな違いはなく、水平方向周期2.5秒、アスペクト比2.0で70~80%であった。

3.3 上下方向周期と軸力変動率の関係

上下方向の固有周期は、上部構造の剛性と免震装置の鉛直剛性との連成により決まる。そのため、水平方向周期を2.5秒に設定し、観測波の違いにより軸力変動率に与える影響をより明確にするため、上下方向周期をパラメータとして軸力変動率との関係を検討した。

観測波のなかで最大加速度が大きい神戸、大阪 (JMA)、および福島 (関震協) での波形と El Centro について、アスペクト比2.0の結果を図-11に示す。大阪 (JMA) による値では、もともと他の観測波に比べ入力加速度が小さいため軸力変動率は小さくなっている。福島 (関震協)、El Centro では、上下方向周期0.1秒前後で軸力変動率が1.0を上回っている。特に、神戸 (JMA) の場合、上下方向の広い周期領域で、軸力変動率が1.0を超えており免震構造の軸力変動に着目した場合、非常に厳しい入力であることがわかる。また、El Centro, Taft, Hachinoheの観測波について、最大速度振幅を50

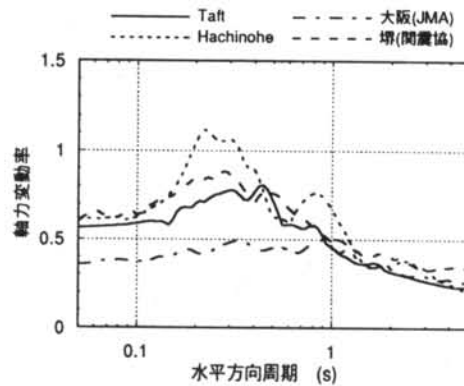


図-10 軸力変動率と水平周期の関係 (Taft, Hachinohe, 大阪, 堺) アスペクト比2.0, 上下方向振動数10Hz

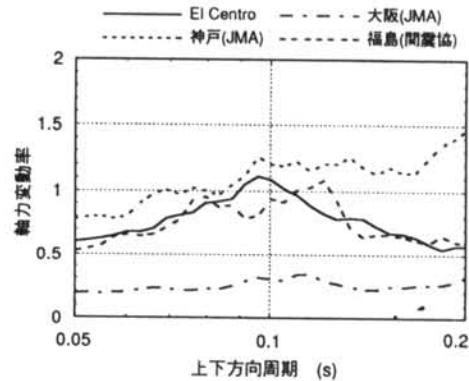


図-11 軸力変動率と上下周期の関係 (El Centro, 神戸, 大阪, 福島) アスペクト比2.0

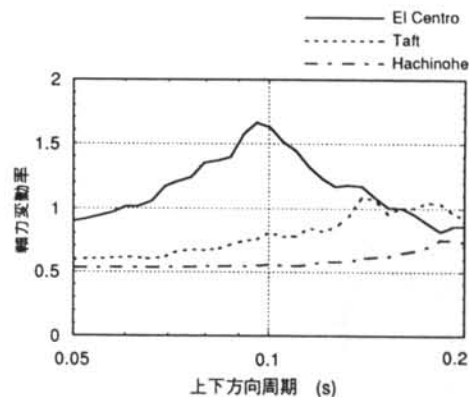


図-12 軸力変動率と上下周期の関係 (El Centro, Taft, Hachinohe 50cm/s相当) アスペクト比2.0

cm/s相当に規準化して同様な検討を行った結果を図-12に示す。観測波の違いにより最大軸力変動率を示す上下方向周期は異なるものの、各観測波とも

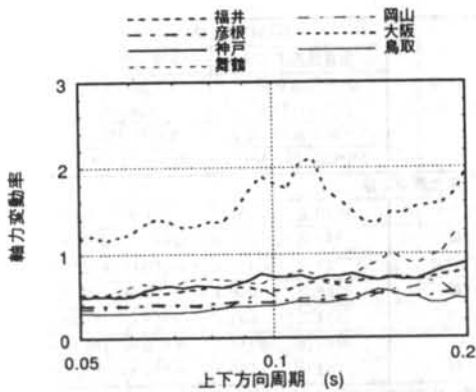


図-13 軸力変動率と上下周期の関係 (JMA観測波500 cm/s²基準化) アスペクト比2.0

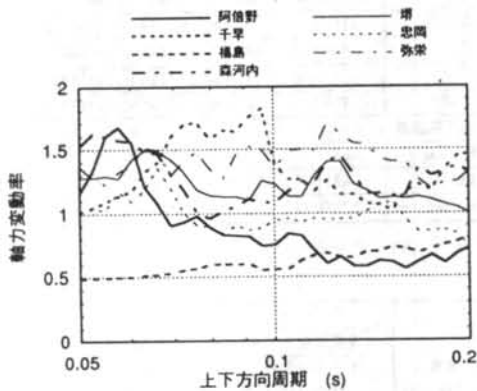


図-14 軸力変動率と上下周期の関係 (関震協観測波 500cm/s²基準化) アスペクト比2.0

軸力変動率が1.0を上回る上下方向周期が認められる。特に、El Centroの場合、周期0.1秒前後で軸力変動率が非常に大きくなっている。

観測波形の特徴が軸力変動に与える影響を、より明確にするため水平方向加速度最大値が500cm/s²になるよう規準化し、上下方向加速度は各波形水平方向の加速度倍率を上下方向加速度に適用して設定し、同様な検討を実施した。

図-13, 14に兵庫県南部地震で得られた観測波についての結果をまとめる。際だって軸力変動率が大きいのは大阪 (JMA) の場合であり、また、関震協の各波形についても軸力変動率が大きくなっている。この結果より、水平方向の波形の周期特性が免震構造の固有周期である長周期範囲に勢力を持ち、かつ上下方向加速度が水平方向に匹敵する場合に軸力変動率が1.5~2.0と非常に大きな値を示している。

特に、大阪平野で観測された波形にその傾向が強い。一方、神戸 (JMA) での結果は、周期0.2秒で軸力変動率1を超えるものの、大阪を除く他のJMA観測波と際違った違いは認められない。

以上の検討結果から、加速度最大値で規準化した入力についての軸力変動を検討した場合、入力地震動の水平方向の長周期成分が大きく、且つ上下動が大きい場合に、軸力変動率が非常に大きくなり最も厳しい条件と言える。

§ 4. 水平・上下方向応答の同時性に関する検討

前章で免震建物の剛体モデルから算定した免震装置の軸力変動率は、水平、上下両方向加速度応答による変動軸力の最大値の重ね合わせであることから、多質点モデルの解析結果の場合に比べ、大きな値となっている。そのため、剛体モデルから実際の軸力変動率を推定するため、本章では一つの試みとして、水平および上下方向応答最大値の同時性に着目して、各観測波について検討を行った。

4.1 検討建屋モデル

検討した建物のモデルは免震建物と、合わせて在来構法の建物についても検討した。特性を単純化するため1質点モデルとし免震建物は水平方向固有周期2.5秒、減衰定数15%と設定し、在来構法による建物は水平方向固有周期0.5秒、減衰定数5%とした。また上下方向については免震構造物および通常構造物とも周期0.1秒、減衰定数は5%とした。

4.2 応答同時性の評価方法

同時性の評価は、時刻歴波形の最大値に着目し、一方の最大値が発生した時刻における他方の応答値により評価する方法などが検討されている^{5), 6)}。本論文では、各観測波に対して水平、上下各方向それぞれ独立に加速度応答を求め、その加速度応答の包絡線から応答同時性を検討する。包絡線は、加速度応答波形のフーリエ変換を行い、複素フーリエ係数の共役複素数を求め、その実数部と虚数部を入れ替え、逆フーリエ変換により得られた波形と、元の応答波形の2乗平方根より求めた。

神戸、大阪 (JMA) についてUD, NS方向について求めた包絡線を図-15に示す。その同一時刻にお

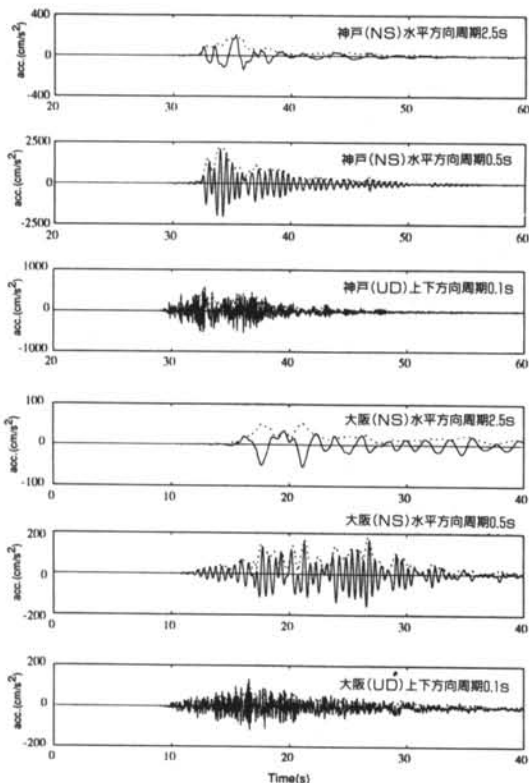


図-15 応答加速度波形および包絡形状(神戸, 大阪)

る水平、上下方向の応答加速度包絡線の積の最大値(以後、「同時性最大値」と示す)により、水平、上下方向応答の同時性の評価を行うものとした。また、水平、上下各方向で最大値が1となるように標準化した包絡線の積の最大値(以後、「同時性係数」と示す)も同時性を評価する上での一つの指標とした。

4.3 応答同時性の検討結果

各観測波について求めた同時性最大値および同時性係数を、表-4、5にそれぞれ示す。

4.3.1 各地気象台での観測波による検討

JMA観測波(7カ所)による結果から、免震建物モデルの場合のNS, UD方向について、水平および上下方向応答の包絡線の積を図-16に示す。震源距離が長くなるほど、同時性最大値は低下し、包絡線の積の形状は次第に広がりを持つ傾向が認められる。これは免震建物および在来構法による建物とも同じ傾向を示した。

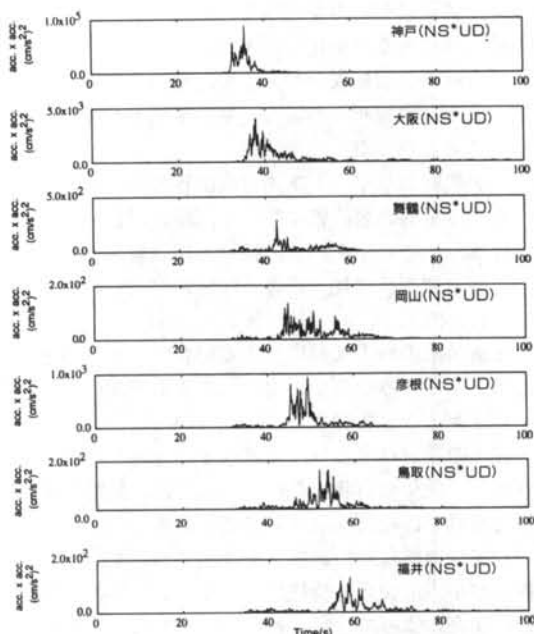
免震建物の同時性係数は、神戸海洋気象台による結果が最も大きな値を示しており、0.88となっている。

地震波 (地点)	同時性最大値(cm/s ²)			
	免震建物モデル		在来構法建物モデル	
	水平固有周期: 2.5s(15%)		水平固有周期: 0.5s(5%)	
	上下固有周期:0.1s		上下固有周期:0.1s	
	NS*UD	EW*UD	NS*UD	EW*UD
気象台観測記録				
福井	130.3	151.6	966.8	971.7
彦根	943.9	524.8	12340.0	20910.0
神戸	87720.4	66463.0	646100.0	495800.0
舞鶴	286.7	210.4	6905.0	7975.7
岡山	134.1	102.2	4215.0	4008.4
大阪	3995.2	3356.9	10830.0	10320.0
鳥取	162.8	180.5	3584.8	5105.2
関西地震観測研究協議会記録				
阿倍野	5409.7	8305.3	38827.8	34508.9
千早	2174.5	1751.7	14287.4	10779.5
福島	42350.4	25837.5	149827.7	124370.3
森河内	11602.1	8672.8	99852.4	37093.8
堺	9245.5	6183.1	53236.3	30868.8
忠岡	12728.0	7138.6	111110.0	90335.9
弥栄	8163.9	7071.0	145195.4	99473.2
既往観測波				
El Centro	56677.0	35442.9	180522.5	219453.5
Taft	6316.7	4479.0	41284.1	50075.8
Hachinohe	12369.0	10971.3	43821.4	34710.3

表-4 同時性最大値

地震波 (地点)	同時性係数			
	免震建物モデル		在来構法建物モデル	
	水平固有周期: 2.5s(15%)		水平固有周期: 0.5s(5%)	
	上下固有周期:0.1s		上下固有周期:0.1s	
	NS*UD	EW*UD	NS*UD	EW*UD
気象台観測記録				
福井	0.78	0.66	0.70	0.66
彦根	0.63	0.62	0.62	0.80
神戸	0.78	0.88	0.57	0.85
舞鶴	0.51	0.26	0.83	0.53
岡山	0.49	0.63	0.63	0.61
大阪	0.57	0.41	0.46	0.42
鳥取	0.50	0.48	0.70	0.87
関西地震観測研究協議会記録				
阿倍野	0.58	0.54	0.48	0.43
千早	0.40	0.32	0.55	0.57
福島	0.71	0.35	0.59	0.41
森河内	0.45	0.71	0.74	0.46
堺	0.60	0.37	0.61	0.62
忠岡	0.49	0.31	0.54	0.88
弥栄	0.34	0.38	0.85	0.92
既往観測波				
El Centro	0.52	0.32	0.31	0.28
Taft	0.81	0.67	0.68	0.80
Hachinohe	0.63	0.65	0.51	0.70

表-5 同時性係数



図一16 加速度応答包絡線の積の形状 (JMA 各観測波, 水平方向周期2.5s, 上下方向周期0.1s)

る。震源距離との関係は明確ではないが、他の観測波による結果は、神戸海洋気象台の結果に比べ小さい。

在来構法の建物の場合についても神戸での同時性係数は0.852と大きな結果を示している。しかし、免震建物の場合と異なり、神戸以外の観測点でも同時性係数が0.8を超える場合が数点ある。

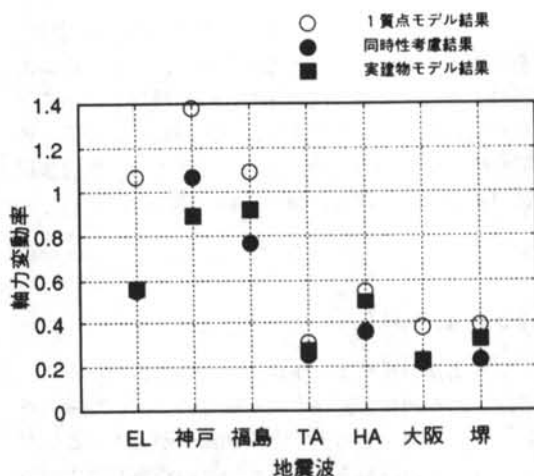
免震構造物は在来構造物に比べ、水平方向応答加速度の低減効果が大きく、同時性最大値は小さな値を示している。

4.3.2 関震協観測波による検討

関震協7カ所の観測波について同様の検討を行った。免震建物については同時性係数は大きなところで福島、森河内約0.7を示しているが、神戸(JMA)の同時性係数を下回る結果であった。一方、在来構法の建物では、同時性係数が忠岡、弥栄で0.8を上回る結果が得られた。免震建物の同時性最大値では福島が大きな値を示しており、神戸(JMA)での結果の約1/2であった。

4.3.3 既往の観測波による検討

兵庫県南部地震で得られた観測波の他に、設計に広く用いられているEl Centro, Taft, Hachinohe波についても同様の検討を行った。特に、El



図一17 軸力変動率と地震波の関係 (建物モデル: アスペクト比2.8, 装置上下方向振動数15Hz)

Centroの場合、水平、上下各方向の応答加速度最大値の積は神戸(JMA)の値を上回っているが、同時性係数、同時性最大値ともに小さくなっている。Taftの場合、同時性係数は大きいものの、応答加速度が小さいことから同時性最大値は小さい。

これらの結果より、震源近傍の神戸(JMA)での観測波では、その加速度絶対値の大きさのみならず、水平および上下応答の同時性(同時性最大値、同時性係数)が他の観測波に比べ大きな結果であった。特に免震構造においてその傾向が顕著である。

4.4 応答の同時性を含めた軸力変動の考察

2章で検討した免震建物の多質点モデルについて、固有値解析から求めた水平、上下各方向の1次の固有振動数を、1質点の固有振動数と仮定して剛体モデルにより軸力変動率を求めた。この軸力変動率と各地震波による水平および上下方向応答の同時性係数との積による結果と、多質点モデルにより得られた結果の比較を図一17に示す。この結果から、El Centroの場合には、応答加速度が大きいものの、軸力変動率が小さい結果をよく示している。一方、同時性を考慮し推定した結果と、多質点モデルとの結果に差があるものもあり、今後より多くのデータを基に検討が必要と考えられる。

加速度応答が大きく、応答の同時性が高い観測波の場合には、軸力変動率も大きな結果となり、免震装置に引張力が生じる可能性が大きくなるのも当然の結果である。このような場合には免震装置の軸力

変動を評価する上で水平および上下の応答の同時性を考慮する必要があると考えられる。兵庫県南部地震による各地の観測波のうち、今回検討した中では、神戸（JMA）、福島（関震協）の観測波による応答の同時性および軸力変動が大きいことから、免震装置に引張力が生じる可能性が高い。

§5. おわりに

免震構造の水平、上下両方向の応答の観点から、兵庫県南部地震で記録された観測波について検討を行った。特に、その上下方向加速度が大きいことから、これらの波形を入力した場合の免震装置の軸力変動に着目して検討した。また、これまで広く用いられてきた観測波（EI Centro等）との比較から、今回記録された観測波の特徴を検討した。得られた知見を以下に列記する。

- ・多質点系免震建物モデルの応答解析結果から、各地の記録による応答加速度、応答変位の結果は、これまで用いられてきた観測波（EI Centro等）の最大速度振幅50cm/s相当の入力に対してほぼ同等の結果であった。しかし、軸力変動は、神戸（JMA）、福島（関震協）の記録による結果が大きく、免震装置に引張力が生じる可能性がある。
- ・免震建物の建屋剛体モデルによる免震装置の軸力変動率と上下方向周期の関係から、神戸海洋気象台での記録は幅広い周期範囲で軸力変動率が大き

く、装置に引張力が生じる可能性が高い。

- ・最大加速度で規準化した入力による検討では、水平方向の長周期成分が大きく、且つ上下動が大きい大阪での観測波の場合、軸力変動率が大きくなる結果となった。
- ・免震建物の水平、上下両方向応答の同時性の観点から、応答の包絡線に基づく同時性評価の手法を提案し、その結果から、神戸海洋気象台での記録は他の観測波に比べ応答の同時性が高い結果が得られた。
- ・免震装置の軸力変動に与える影響は、入力加速度の大きさのみならず、水平、上下両方向応答の同時性が大きく影響することが分かった。

以上の検討結果より、免震建屋の応答を評価するうえで、建屋の形状、剛性によっては、免震装置の軸力変動を詳細に検討する必要がある。なお、本検討では地盤ばねの影響は考慮しておらず、免震装置の水平方向復元力特性に与える影響も無視している。場合によっては、これらの影響も含めた検討が必要になると考えている。

謝辞 本論文で用いた地震動記録は、当社も会員である関西地震観測研究協議会が収録したものであり、関係者のご努力により得られた貴重な記録を、使わせて頂きました。同じく、各地気象台での記録は、気象庁が観測し一般に公開されたもので、関係各位のご努力により、使わせて頂きました。上記記して深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 猿田正明, 須賀川勝, 渡辺弘之, ほか3名: “免震構法に関する実証試験(その5) 高減衰積層ゴムの振動試験・地震観測” 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1988年) pp. 475~476
- 2) 日本免震構造協会: “米国に於ける免震建物の現況調査報告” 日本免震構造協会, (1994年) pp. 21~24
- 3) 伊澤清治: “大震災と免震建築 (株)松村組技術研究所・研究棟” MENSIN, (1995年) No.8 春号, pp. 18~23
- 4) 中澤俊幸: “大震災と免震建築 兵庫県南部地震観測記録結果(WESTビル)” MENSIN, (1995年) No.8 春号, p. 24
- 5) 中川恭次, 渡辺清治, 角田智彦, 藤山満: “水平と鉛直地動の非同時性による双方最大応答値からの低減評価の検討” 第6回日本地震工学シンポジウム, (1982年) pp. 1129~1135
- 6) 黒田克彦: “地震時における上下動に関する基礎的検討” 第6回日本地震工学シンポジウム, (1982年) pp. 1137~1143
- 7) 和田章, 吉田献一: “積層ゴムアイソレータの上下変形を考慮にいたる免震構造の動的挙動に関する研究” 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1992年) pp. 769~770
- 8) 岩本真二, 内田治, 荒川利治, 洪忠喜: “免震支持建物のロッキング変形と地震応答性状” 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1987年) pp. 737~738
- 9) 日本建築学会: “免震構造設計指針” 日本建築学会, (1993年)