

地震動の観測記録を用いた免震建物応答変位の予測

1. はじめに

建築基準法では、免震建物の設計目標を「極めてまれに発生する地震に対して、ほとんど損傷がないか、又は軽微であること」としている。具体的には、極めてまれに発生する地震動を震度 6 強、最大速度で 50～60kine と想定している。損傷の程度は住宅の場合層間変形角で 1/200 以下としている。免震住宅の場合、限界変形以内であれば損傷は無いと考えられる。問題は免震層の変位である。限界変形を越えた場合には、免震機能が損なわれ重大な損傷が生じる。従って、免震建物を設計するにあたり、限界変形をどこに設定するかは、大変重要な問題である。

これまで免震建物の設計には阪神大震災の神戸海洋気象台の記録(JMA KOBE 818 gal)が標準的に用いられてきた。この地震動は最大速度が 91kine で建築基準法が想定している地震動(50～60kine)を大きく上回ることから、この地震動で設計しておけば十分であると考えられてきた。しかし、2004 年の新潟県中越地震では JMA KOBE の 1.5 倍の地震動が観測された。こうした状況から、建築基準法は最低限満足しなければならない性能として、上限はどの程度を想定しておく必要があるかが問題となっている。

免震層の変位は、地震動の特性によって大きく異なるため数多くの観測記録を統計的に処理して算定することが望ましい。日本国内では、阪神大震災を契機に地震観測網が整備され、独立行政法人防災科学研究所の強震ネットワーク K-NET だけでも 1,037 地点で観測が行われている。さらに近年大きな被害を伴う地震が相次いでいる。従って、統計的な処理に十分なデータが蓄積されたと考える。

ここでは、最近 10 年間にマグニチュード 6.5 以上の地震で観測された主要な地震動 150 波を用いて免震建物の応答変位を計算し、震度階と免震変位の予測値を算出した。

2. 計算方法

免震建物を 1 質点系にモデル化する。固有周期を 4 秒とし、すべり支承の摩擦係数は 0.10 とした。摩擦係数の標準値は 0.13 であるが、安全側をとり 0.10 とした。従って、最大変位は大きめに算出される。

計測震度は、3 成分の加速度記録を用いて、気象庁告示第 4 号に従って算定した。

入力時振動の諸元を表-1,2,3 に示す。

3. 計算結果

図-1 に最大変位と計測震度の関係を示す。ただし、計測震度は 0.5 を加算した値で示した。

変位が特に大きくなった地震波は、2007 年新潟県中越沖地震の柏崎の観測波(M6.8, 震度 6 強)で NS が 82cm, EW が 44cm である。次いで、2003 年十勝沖地震の直別の観測波(M8.0, 震度 6 強)で NS が 39cm, EW が 50cm である。また、2007 年能登半島地震の穴水の観測波のように震度 6 弱で変位が 33cm となる例がある。これらの観測波は、地盤の特性と地震波の特性とによって応答値が大きくなったと思われる。しかし、これらは学会でも話題になっている特殊な地震波で、その特性及び原因については十分に解明されていない。

神戸海洋気象台の記録(JMA KOBE)の免震変位は 19cm である。この変位を上回る地震動は 10 波ある(図-1 参照)。これらを特殊な観測値として除外する方法も考えられる。しかし、以下では、これらも含めて統計的に処理する。

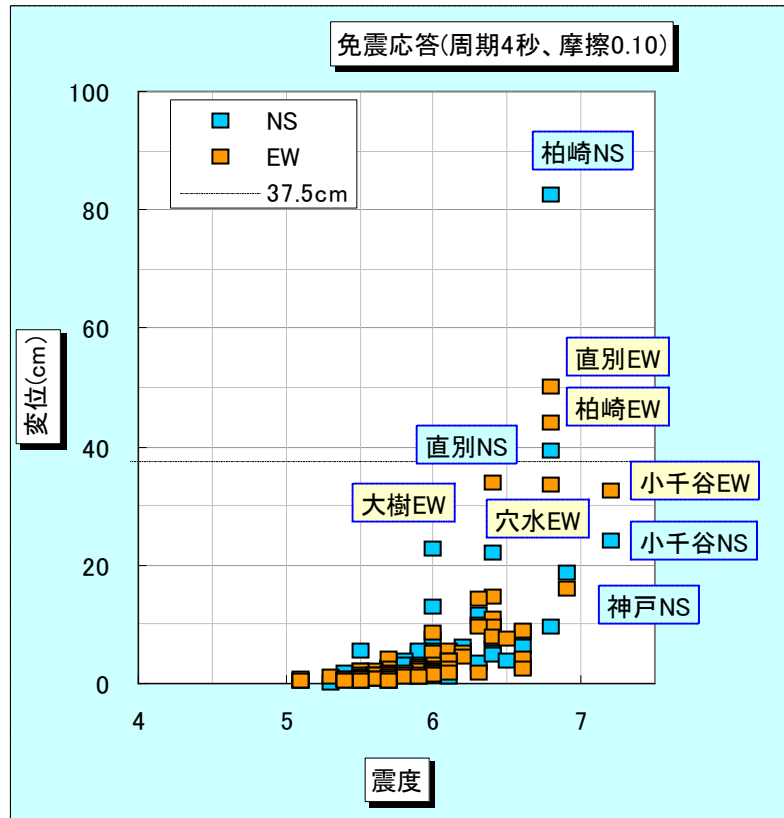


図-1 最大変位と計測震度

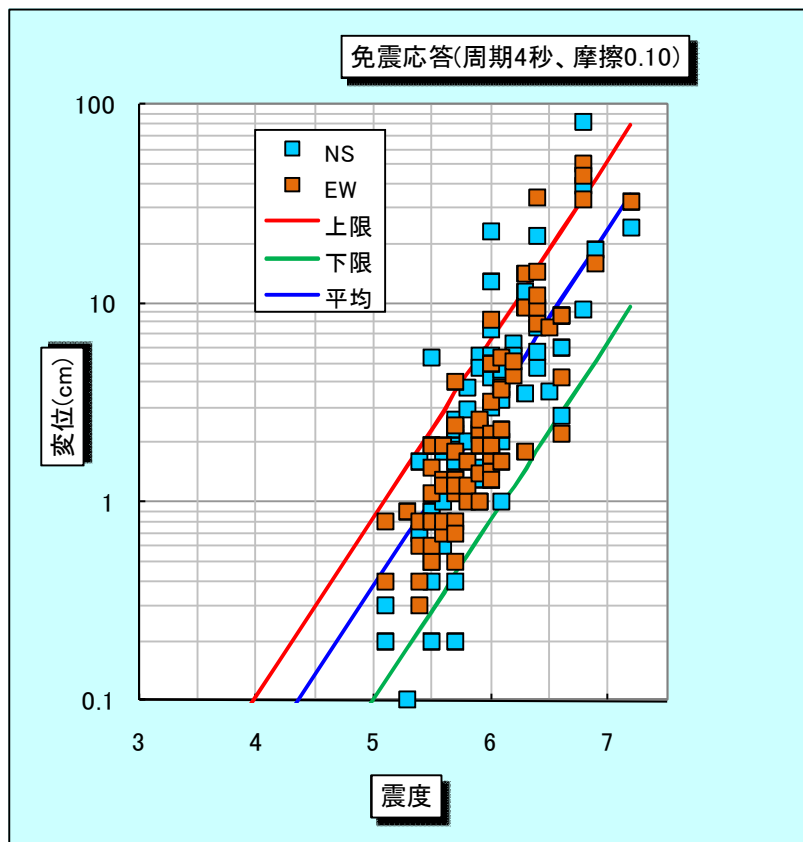


図-2 免震変位の近似式

図-1 で応答変位の対数を取り、直線で近似した(図-2、平均参照)。この近似式と応答変位との標準偏差から上限と下限の近似式を統計的に求めた(図-2、上限、下限参照)。平均の近似式と上限の近似式から、各震度階での免震建物の最大変位を示すと表-4 になる。

表-4 免震建物の地震時の予測変位

震度階	予測変位(cm)		
5弱	1.0	～	2.3
5強	3.0	～	6.5
6弱	8.3	～	18.4
6強	23.4	～	51.9

平均の近似式は、震度を X として

$$\delta = 10^{0.90X - 3.93} \quad (\text{mm})$$

となる。上限の近似式は、

$$\delta = 2.2 \times 10^{0.90X - 3.93} \quad (\text{mm})$$

となる。

4. まとめ

最近 10 年間に国内で観測されたマグニチュード 6.5 以上の主要な地震動に阪神大震災の神戸海洋気象台の記録(JMA KOBE)を加えた 150 波を用いて免震建物の応答変位を計算した。

免震建物は 1 質点系にモデル化し、固有周期を 4 秒、すべり支承の摩擦係数を 0.10 とした。

その結果、これまで免震建物の設計に標準的に用いられてきた JMA KOBE の最大変位は 19cm であった。最大変位が 20cm を越える地震動は、10 波であった。

150 波の応答変位を統計的に処理して、平均の近似式と上限の近似式を求めた。平均の近似式で震度 6 強(震度 6 強と震度 7 との境界値)の値は、23.4cm になった。同様に上限の値は 51.9cm になった。

震度 7 と判定される地震動は 2 波しかない為、震度 7 の予測は統計的にも信頼性は高いとは言えない。しかし、ひとつの目安にはなる。すなわち、限界変形 51.9cm あれば、150 波の内柏崎 NS の 1 波以外の地震波の最大変位以下になる。

免震ハウス株式会社の「木造住宅すべり支承」は、全長が 850mm で基準変形は $(850 - 105) / 2 = 372$ mm である。従って、柏崎 NS, EW と直別 NS, EW の 4 波以外の地震波の最大値以下になる。

表-1 入力時振動

地震名	観測地点	地名	記号	震度	加速度			速度		
					EW	NS	UD	EW	NS	UD
兵庫県南部地震 1995/1/17 M7.3	兵庫県	神戸	JMA KOBE	6.9	617	818	332	76	91	40
鳥取西部地震 2000/10/6 M7.3	広島県	油木	HRS005	5.5	310	524	216	8	14	5
	岡山県	新見	OKY004	6.1	527	815	171	14	27	6
	鳥取県	江府	TTR007	6.3	726	573	404	43	28	11
	鳥取県	米子	TTR008	6.3	314	384	308	36	54	10
	鳥取県	日南	TTR009	5.9	628	596	289	38	26	13
三陸南地震 2003/5/26 M7.0	岩手県	山田	IWT006	5.9	326	340	195	20	22	7
	岩手県	釜石	IWT007	5.9	594	1038	592	16	21	7
	岩手県	北上	IWT012	5.9	505	432	157	27	17	7
	岩手県	遠野	IWT013	5.7	391	402	266	18	13	6
	宮城県	気仙沼	MYG001	5.8	391	358	344	17	16	9
	宮城県	歌津	MYG002	5.9	591	858	339	22	16	6
	宮城県	石巻	MYG010	5.8	276	237	116	23	15	5
	宮城県	牡鹿	MYG011	6.6	1101	1114	825	50	35	20
十勝沖地震 2003/9/26 M8.0	北海道	標津	HKD066	6.4	430	492	157	43	52	10
	北海道	本別海	HKD070	6.1	476	350	113	37	33	7
	北海道	釧路	HKD077	6.1	311	407	164	36	41	10
	北海道	阿寒	HKD084	6.2	351	354	115	44	47	16
	北海道	直別	HKD086	6.8	728	801	271	67	125	35
	北海道	浦幌	HKD091	6.3	391	374	325	57	70	22
	北海道	池田	HKD092	6.4	433	609	215	55	56	18
	北海道	大樹	HKD098	6.4	366	346	202	76	74	34
	北海道	広尾	HKD100	6.5	809	970	461	43	48	21
十勝沖地震(余震) 2003/9/26 M7.1	青森県	南通	AOM007	5.7	258	167	86	18	14	5
	北海道	広尾	HKD100	5.5	271	426	112	11	14	3
	北海道	浦河	HKD109	6.4	592	409	133	42	48	13
東海道沖地震 2004/9/5 M7.4	三重県	白山	MIE007	5.1	209	384	87	6	8	3
	和歌山	田辺	WKY009	4.2	45	82	55	3	3	2

表-2 入力時振動(続き)

地震名	観測地点	地名	記号	0.0	加速度			速度		
					EW	NS	UD	EW	NS	UD
新潟県中越地震 2004/10/23 M6.8	新潟県	鹿瀬	NIG012	5.4	237	291	63	16	15	4
	新潟県	長岡	NIG017	6.0	468	369	331	47	23	15
	新潟県	小千谷	NIG019	7.2	1144	1314	820	98	128	31
	新潟県	小出	NIG020	6.0	522	408	312	31	27	13
	新潟県	十日町	NIG021	6.6	1716	849	564	52	51	13
	新潟県	津南	NIG023	5.5	397	275	86	25	26	10
新潟県中越地震(余震) 2004/10/23 M6.5	新潟県	小千谷	NIG019	3.4	22	19	30	1	1	0
	新潟県	小出	NIG020	6.1	527	525	329	27	35	10
	新潟県	十日町	NIG021	6.6	816	812	220	58	50	10
	新潟県	安塚	NIG024	6.0	521	398	118	25	22	6
釧路沖地震 2004/11/29 M7.1	北海道	厚床	HKD071	5.6	272	416	97	12	17	3
	北海道	納沙布	HKD074	6.0	493	550	319	22	29	5
	北海道	浜別	HKD075	5.3	187	258	100	17	28	6
	北海道	釧路	HKD077	5.8	242	253	89	32	21	7
	北海道	弟子屈	HKD080	5.5	319	353	166	16	25	6
福岡県西方沖地震 2005/3/20 M7.0	福岡県	福岡	FK0006	6.0	277	239	138	59	32	10
	福岡県	前原	FK0007	5.6	196	260	174	14	22	10
	長崎県	平戸	NGS001	5.5	232	356	81	11	14	3
宮城県沖地震 2005/8/16 M7.2	福島県	相馬	FKS001	5.6	358	217	111	22	16	5
	宮城県	歌津	MYG002	5.4	501	301	190	15	8	6
	宮城県	築館	MYG004	5.7	514	382	111	15	15	4
能登半島地震 2007/3/25 M6.9	石川県	正院	ISK002	5.6	174	159	138	22	25	10
	石川県	輪島	ISK003	6.0	519	396	141	39	22	14
	石川県	能都	ISK004	6.0	622	589	147	23	19	7
	石川県	穴水	ISK005	6.8	473	780	556	34	99	19
	石川県	富来	ISK006	6.4	717	849	462	39	51	21
	石川県	七尾	ISK007	5.7	203	182	167	27	33	8
	石川県	羽咋	ISK008	5.4	229	381	298	16	23	9

表-3 入力時振動(続き)

地震名	観測地点	地名	記号	0.0	加速度			速度		
					EW	NS	UD	EW	NS	UD
新潟県中越沖地震 2007/7/16 M6.8	新潟県	寺泊	NIG016	5.1	227	359	55	6	15	3
	新潟県	柏崎	NIG018	6.8	668	511	369	110	83	26
	新潟県	小千谷	NIG019	6.0	391	455	116	21	46	9
	新潟県	十日町	NIG021	5.5	212	276	63	14	17	8
	新潟県	直江津	NIG025	5.7	190	224	55	23	27	5
宮城内陸地震 2008/6/14 M7.2	秋田県	椿台	AKT023	5.7	359	359	248	21	25	15
	岩手県	一関	IWT010	5.5	219	287	210	22	25	13
	宮城県	築館	MYG004	6.2	740	678	224	46	39	15
	宮城県	鳴子	MYG005	6.0	440	521	666	70	33	20
	宮城県	古川	MYG006	6.0	238	233	104	35	41	15
岩手県沿岸北部 2008/7/24 M6.8	青森県	八戸	AOM012	6.0	446	534	230	20	22	7
	岩手県	種市	IWT001	6.1	827	650	275	26	29	8
	岩手県	普代	IWT003	5.7	181	245	158	11	28	4
	岩手県	田老	IWT004	5.7	279	408	212	11	21	9
	岩手県	釜石	IWT007	5.6	491	460	256	14	18	4
	岩手県	一関	IWT010	5.4	390	158	79	15	11	6
	岩手県	北上	IWT012	5.7	322	242	154	18	17	7
	岩手県	岩泉	IWT019	5.9	276	432	222	17	28	10
	岩手県	西根	IWT021	5.7	433	447	96	20	16	5