

## 第4章 免震建築物の地震応答計算

### 4-1 検討用入力地震動

検討に用いた地震動は内閣府（2012）の南海トラフ沿いの巨大地震の断層モデル(Mw9.0)に基づき設定された4連動6セグメント震源モデル（日向灘域、南海域、東海域、駿河湾域）を用い、改良経験式により作成された長周期地震動（平均波）である。この地震動は9地点で試作されているが、昨年度と同様に、大阪市此花、愛知県津島市、東京都新宿、静岡県浜松市の4地点の地震動を用いて検討を行った。地震動の作成においては、乱数の異なる21波から1波選定しているが、選定方法として、擬似速度応答スペクトルの対数平均値と21波の速度波形のうち最大速度が中央値の位相スペクトルを用いて再作成した地震動（三の丸波作成手法）を用いた。表4.1-1に地震動の諸元を示す。図4.1-1に速度応答スペクトルを、図4.1.2にエネルギースペクトルを、昨年度の採用波とともに示す。2011年までは回帰式作成上のばらつきを考慮し、平均波（AV波）と平均+標準偏差波（SD波）があったが、2012年度は平均波しか作成されていない。ここにおいて、赤の破線は2012年度の波、青の実線が2011年度のSD波、赤の実線が2011年度のAV波である。これらの入力地震動は、第3章で用いたものと同じであり、内閣府南海トラフ3連動の平均波を本章ではAV波、同平均+標準偏差の波を、SD波と呼んでいる。また、本検討2章で示した内閣府南海トラフ4連動（Mw=9）に対する長周期地震動（平均波）を2012波と呼んでいる。

それぞれの地震動の卓越する周期帯は昨年度の波と概ね同様であるが、此花では2011年度は6秒付近にあったピークが7秒付近に出ている。また、津島では2011年度の波に見られた4秒付近のスペクトルの落ち込みがなくなっている。

応答スペクトルの大きさは、此花では速度応答スペクトルは2011年度のSD波と2012年度の波（AV波）がほぼ同じになっているが、エネルギースペクトルでは2012年度の波は2011年度のSD波よりもやや小さい。津島では速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに2012年度の波は2011年度のSD波よりもはるかに大きく、1.5～2倍程度になっている。ピークでは速度応答で最大240cm/s程度、エネルギー等価速度で600cm/s程度と非常に大きい。新宿は速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに、周期5秒以上では今年度の波は2011年度のSD波とほぼ同じであるが、5秒以下では2011年度のSD波よりもやや大きい。浜松は速度応答スペクトル、エネルギースペクトルともに、2011年度のAV波とほとんど同じである。

表 4.1-1 検討用地震動一覧

略称	対象地震・評価地点など	加速度 cm/s <sup>2</sup>	速度 cm/s	継続時間 s
OSKH02	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 此花 平均	133.0	46.5	655.0
AIC003	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 津島 平均	545.4	67.9	655.0
KGIN	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 新宿 平均	55.5	31.7	655.0
SZO024	南海トラフ4連動地震(Mw9.0) 浜松 平均	640.3	42.8	655.0

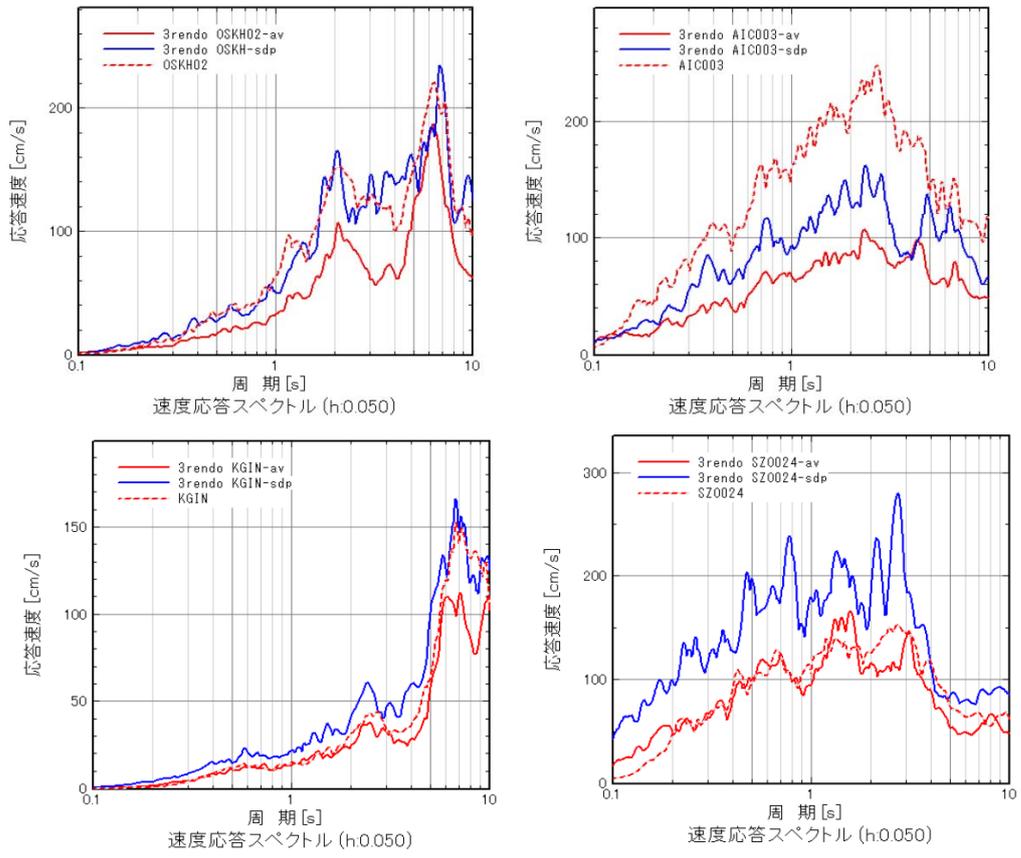


図 4.1-1 速度応答スペクトル ( $h=0.05$ )

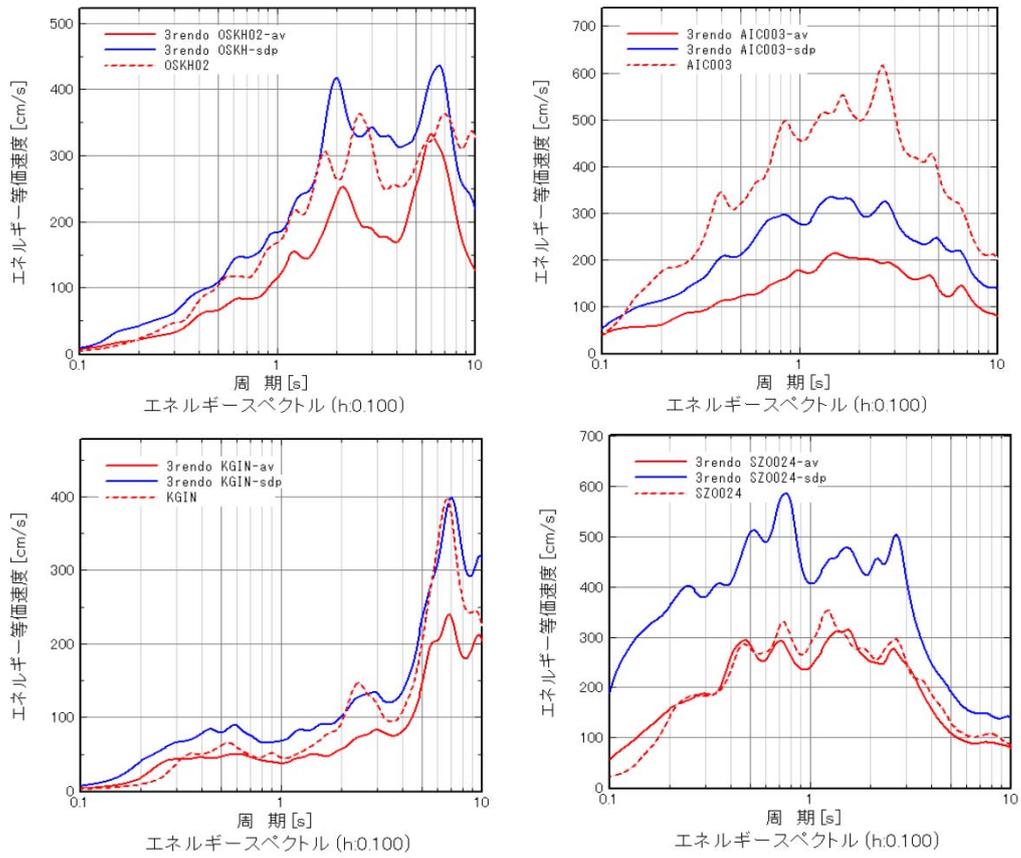


図 4.1-2 エネルギースペクトル ( $h=0.10$ )

## 4-2 検討用建物

検討に用いた建物は2011年度用いた22棟に2棟追加した全24棟であり、このうち12棟についてはエネルギーの検討も行った。これらのモデルは、設計時期・建物高さ・免震システムなどがバランスよく網羅されるように選定している。ここにおいて、設計時期は第一期（1994年以前）、第二期（1995年～1999年）、第三期（2000年以降）の3期に分類し、建物高さは低層（20m未満）、中高層（20m～60m未満）、超高層（60m以上）の3つに分類している。

表4.2-1に検討建物の諸元を示す。ここにおいて、網掛したモデルはエネルギーの検討を行ったモデルである。また、図4.2-1に検討建物の建物高さとし積層ゴム200%ひずみ時の固有周期を示す。高さが高いほど固有周期は長くなっているが、選定した建物は周期2～7秒の範囲で幅広く分布している。

表 4.2-1 検討建物諸元

記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	固有周期	
						基礎固定 (s)	200%ひずみ時 (s)
A-1	低層第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	0.41	1.77
A-3	中高層第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	0.73	3.25
B-3	低層第3世代	13.1	2000	RC	NR+SL+OD	0.217	3.36
B-4	超高層第3世代	120.9	2006	RC	NR+SL+OD	3.16	6.19
C-2	中高層第1世代	36.1	1994	SRC、S	LRB	0.82	2.99
C-4	超高層第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	2.27	4.93
D-2	中高層第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	0.863	3.45
D-4	超高層第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	3.45	6.43
E-1	中高層第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	0.79	3.4
E-2	中高層第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	0.68	2.56
E-3	超高層第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	1.78	5.24
E-4	中高層第3世代	34.0	2004	RC	LRB	0.87	3.87
F-3	中高層第3世代	31.0	2006	S	NR+SL	1.81	4.3
F-4	超高層第3世代	140.0	2006	RC	NR+SL	3.49	5.55
G-3	中高層第2世代	28.7	1997	CFT+S	NR+OD	1.32	4.027
G-4	中高層第3世代	24.2	2001	S	NR+OD	1.039	3.573
H-1	低層第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	0.27	2.23
H-4	超高層第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	1.82	4.02
I-1	中高層第2世代	31.3	1996	RC	HDR	1.1	4.27
I-2	中高層第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	1.57	5.09
J-1	中高層第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+鋼D+OD	0.5	3.04
J-3	中高層第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	0.095	2.75
K-1	中高層第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼棒D	1.05	3.67
K-2	中高層第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CL+OD	0.97	4.85

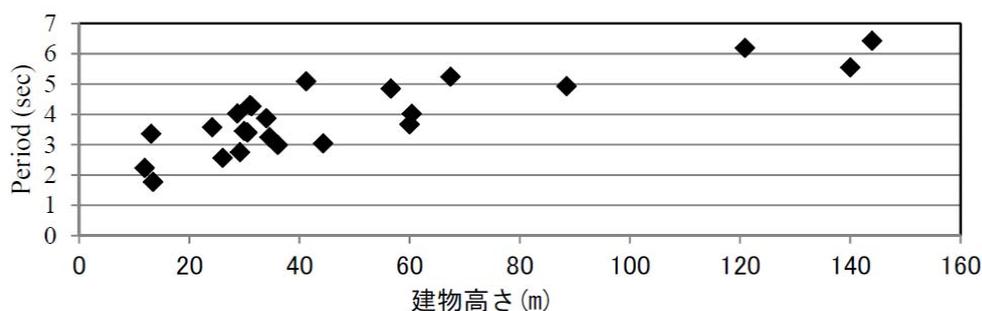


図 4.2-1 検討建物の建物高さとし積層ゴム200%ひずみ時の固有周期

#### 4-3 応答解析結果

応答結果は上部構造については最大加速度、最大層間変形角、ベースシア係数、建物の状態を、免震層については最大変位、最大速度、せん断力係数、免震層の状態を整理した。

ここにおいて、

建物の状態とは、上部建物の応力状態で、下記の4つに分類している。

- ・ 短期許容応以下 主要構造体がすべて短期許容応力度以下となっている状態
- ・ 弾性限以下 主要構造体が短期許容応力度を超えているが、降伏していない状態
- ・ 保有耐力以下 主要構造体が一部降伏しているが、建物の保有水平耐力以下の状態
- ・ 保有耐力以上 建物の保有水平耐力を超えている状態

免震層の状態とは、最大変位時における免震部材の状態で、下記の3つに分類している。

- ・ 許容変形以下 応答変形が免震部材の許容変形以内となっている状態
- ・ 限界変形以下 応答変形が免震部材の許容変形を超えているが、限界変形（またはピットクリアランス）以内となっている状態
- ・ 限界変形以上 応答変形が免震部材の限界変形（またはピットクリアランス）を超えていると状態

解析結果の一部を一覧表にしたものを、表 4.3-1 (1)～(2)に示す。図 4.3-1 に総エネルギー入力速度換算値としての  $h=0.1$  のエネルギースペクトルとともに示す。図 4.3-2 に上部構造のベースシア係数を  $h=0.2$  の加速度応答スペクトルを重力加速度  $g$  で除した  $S_a/g$  とともに示す。図 4.3-3 に免震層の応答変位を  $h=0.2$  の変位応答スペクトル  $S_d$  とともに示す。なお、I-1 棟は AIC003 の場合、応答変位が解析モデルの上限を超えており、解析できていない。

エネルギーの速度換算値は概ねエネルギースペクトルと一致している。また、ベースシア係数や免震層の変位も概ね  $S_a/g$  や  $S_d$  と一致している。

応答ベースシア係数は OSKH02 波で 0.07～0.15 程度であるが、スペクトルのピークである周期 2 秒付近では 0.2～0.25 程度と非常に大きくなっている。また、周期 5 秒付近の応答も大きい。AIC003 波では周期 3 秒～5 秒の範囲で 0.13～0.20 程度と大きく、周期 2.5～3 秒付近では 0.2～0.25 と非常に大きくなっている。KGIN 波では全般的に 0.05 程度と小さい。SZ002 波では AV では周期 3 秒以上では 0.05～0.12 程度だが 3 秒以下となると 0.15～0.20 と大きくなる。

免震層の応答変位は OSKH02 波では周期 4 秒以下では 0.4m 程以下、周期 4 秒以上では 0.4～0.6m と非常に大きく、周期 6 秒付近では 0.8m 程度のものもある。AIC003 波では周期 3～5 秒の範囲で 0.4～0.7m と非常に大きく、周期 2.5 秒付近では 0.8m 程度のものもある。KGIN 波では 0.2m 程度がほとんどであるが、周期 5 秒以上では 0.4m 程度とやや大きくなっている。SZ002 波では AV では全体的に 0.2m～0.4m 程度である。

図 4.3-4～図 4.3-6 にエネルギーの速度換算値、ベースシア係数、応答変位を前回の解析結果とともに示す。前回の結果と比較すると、OSKH02、KGIN、SMZ024 は概ね前回の SD 波と同程度であり、AIC003 は前回の SD よりも遥かに大きくなっている。

図 4.3-7 に上部構造の状態、層間変形角および免震層の状態を示す。図 4.3-8～図 4.3-9 に固有周期ごとの上部構造の状態、免震層の状態を示す。なお、ここにおいて、I-1 棟の AIC003

波は応答が大きく、免震部材の解析モデルの適用範囲を超えているため、件数から除外している。

建物の状態は、OSKH02 は保有耐力以上が 1 棟、弾性限以上-保有耐力以下が 2 棟、短期許容以上-弾性限以下が 4 棟である。AIC003 は保有耐力以上が 2 棟、弾性限以上-保有耐力以下が 6 棟、短期許容以上-弾性限以下が 13 棟であり、損傷の大きい建物が非常に多い。KGIN はすべて短期許容以下であり、SZ0024 は弾性限以上-保有耐力以下が 1 棟、短期許容以上-弾性限以下が 2 棟であり全般的には大きな損傷となっていない。

上部構造の層間変形角は、OSKH02 は 1/100 以上が 1 棟、1/100-1/200 が 5 棟である。AIC003 は 1/100 以上が 1 棟、1/100-1/200 が 7 棟である。KGIN はすべて 1/200 以下であり、SZ0024 は 1/100 以上が 1 棟、1/100-1/200 が 1 棟である。

免震層の状態は、OSKH02 では、限界変位を超えているものが 2 棟、限界変位以下-許容変位以上が 4 棟となっている。AIC003 は限界変位を超えているものが 10 棟、限界変位以下-許容変位以上が 3 棟となっており、約半数が限界変位を超えてしまっている。KGIN はすべて許容変位以下であり、SZ0024 は限界変位以下-許容変位以上が 4 棟あるが限界変位を超えているものは無い。

固有周期ごとに分析すると、OSKH02 では上部構造の状態は周期 2.5 秒未満と 5.0 秒以上で損傷の大きいものが多く、免震層の状態は周期 5 秒以上で限界変位を超えているものが半数ある。AIC003 では周期 2.5 秒未満と 5.0 秒以上で損傷の大きいものが多いが 2.5~4.0 秒でも弾性限を超えているものが多数あり、免震層の状態はほとんどすべての周期で限界変位を超えているものが半数ある。

図 4.3-10~図 4.3-12 に OSKH02 と AIC003 に関して前回との比較を示す。OSKH02 では前回の SD とほぼ同程度であり、AIC003 では前回の SD よりもはるかに上部構造の損傷は大きく、応答変位も限界変位を超えているものが多い。

なお、本検討は積層ゴムのハードニングは考慮されていないので、応答変位が大きい (0.5m 程度以上) の場合は、ハードニングを考慮すれば建物の応答はもっと大きくなっている可能性がある。また、長時間の繰返しによる免震部材の性能変動は考慮していないので、応答変位はもっと大きくなる可能性がある。これに関しては「4.4. エネルギー吸収に関する検討」で考察する。

表 4.3-1(1) 解析結果一覽(1)

記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	固有周期(S)		Ve (m/s)	最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )	最大層間変形角	ベースシア係数	状態	最大変位 (m)	最大速度 (m/s)	状態
							基礎固定	200%心ずみ時								
OSHK02																
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	2.59	2.87	1.61	0.26	0.17	0.67	保有耐力以上	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.23	3.25	2.82	1.33	1.755	0.10	0.30	0.68	短期許容以下	限界変形以下
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	2.72	0.92	1.7033	0.09	0.22	0.61	短期許容以下	許容変形以下
B-4	超高層 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	2.76	2.08	1.174	0.08	0.74	0.85	保有耐力以下	限界変形以上
C-2	中高層 第2世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	2.79	3.01	1.538	0.19	0.30	0.89	弾性限以下	許容変形以下
C-4	超高層 第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	3.41	1.89	1.108	0.12	0.53	0.79	弾性限以下	許容変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	2.78	1.86	1.680	0.09	0.31	0.70	短期許容以下	許容変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	Y	3.45	6.43	1.69	1.47	1.194	0.07	0.55	0.62	短期許容以下	限界変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	2.74	1.37	1.486	0.10	0.24	0.71	短期許容以下	許容変形以下
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼林D	X	0.68	2.56	2.62	1.72	1.263	0.13	0.22	0.70	短期許容以下	許容変形以下
E-3	超高層 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	2.98	1.83	1.120	0.15	1.24	1.30	保有耐力以下	限界変形以上
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	2.78	1.27	1.630	0.09	0.29	0.65	短期許容以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S-CFT	NR+SL	X	1.34	4.17	2.69	2.16	1.349	0.08	0.25	0.64	短期許容以下	許容変形以下
F-4	超高層 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	Y	3.21	5.45	2.66	1.95	1.160	0.08	0.51	0.66	弾性限以下	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	2.62	1.28	1.386	0.12	0.43	0.59	短期許容以下	限界変形以下
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	2.87	1.20	1.490	0.11	0.21	0.57	短期許容以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	2.55	1.93	1.1724	0.20	0.23	0.77	弾性限以下	許容変形以下
H-4	超高層 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	X	1.82	4.02	2.70	2.23	1.1371	0.10	0.28	0.52	短期許容以下	許容変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	2.82	1.60	1.1796	0.14	0.32	0.88	短期許容以下	許容変形以下
I-2	中高層 第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	2.59	1.51	1.1468	0.11	0.28	0.74	短期許容以下	許容変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	2.85	1.46	1.1369	0.12	0.52	0.62	短期許容以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	2.41	1.43	1.1085	0.09	0.24	0.62	短期許容以下	許容変形以下
K-1	中高層 第2世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	2.76	1.50	1.410	0.09	0.27	0.58	短期許容以下	許容変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	2.89	1.09	1.831	0.09	0.46	0.59	短期許容以下	許容変形以下
AIC003																
記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	基礎固定	200%心ずみ時	Ve (m/s)	最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )	最大層間変形角	ベースシア係数	状態	最大変位 (m)	最大速度 (m/s)	状態
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	5.34	4.89	1.32	0.34	0.25	0.88	保有耐力以上	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.73	3.25	4.22	3.21	1.301	0.17	0.60	1.05	保有耐力以下	限界変形以上
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	4.69	1.49	1.4074	0.15	0.41	0.82	弾性限以下	許容変形以下
B-4	超高層 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	3.36	2.23	1.165	0.06	0.45	0.71	弾性限以下	許容変形以下
C-2	中高層 第2世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	5.49	3.65	1.403	0.25	0.53	1.13	弾性限以下	限界変形以上
C-4	超高層 第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	4.73	2.96	1.147	0.10	0.45	0.73	弾性限以下	限界変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	4.18	3.35	1.334	0.13	0.57	1.06	短期許容以下	限界変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	Y	3.45	6.43	2.54	1.95	1.182	0.06	0.31	0.61	弾性限以下	許容変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	4.41	2.09	1.235	0.17	0.62	1.11	保有耐力以下	限界変形以上
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼林D	X	0.68	2.56	4.86	3.00	1.133	0.20	0.38	0.85	保有耐力以下	許容変形以下
E-3	超高層 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	3.37	1.82	1.194	0.09	0.64	0.90	短期許容以下	限界変形以上
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	4.19	2.47	1.367	0.13	0.55	0.97	短期許容以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S-CFT	NR+SL	Y	1.81	4.30	4.06	3.56	1.141	0.13	0.50	1.03	弾性限以下	限界変形以上
F-4	超高層 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	Y	3.21	5.45	3.65	3.16	1.107	0.06	0.28	0.60	保有耐力以上	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	4.25	2.19	1.243	0.19	0.63	1.06	弾性限以下	限界変形以上
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	4.82	2.69	1.317	0.17	0.63	0.76	弾性限以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	4.02	4.24	1.785	0.43	0.81	1.89	保有耐力以下	限界変形以上
H-4	超高層 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	Y	1.82	4.02	4.12	3.53	1.231	0.16	0.44	1.14	弾性限以下	許容変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	4.21	2.44	1.945	0.17	0.57	1.09	短期許容以下	限界変形以上
I-2	中高層 第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	3.85	1.89	1.280	0.14	0.65	1.11	弾性限以下	限界変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	4.21	2.42	1.508	0.13	0.51	0.93	短期許容以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	4.40	2.13	1.219	0.13	0.48	1.02	弾性限以下	限界変形以下
K-1	中高層 第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	4.40	2.13	1.219	0.13	0.48	1.02	弾性限以下	限界変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	4.02	1.91	1.548	0.11	0.61	0.85	弾性限以下	限界変形以上

表 4.3-1(2) 解析結果一覽(1)

記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	固有周期(S)		αy	Ve (m/s)	最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )	最大閉間 変形角	ベースシニア 係数	状態	最大変位 (m)	免震層 最大速度 (m/s)	状態
							基礎 固定	200% ひずみ時									
							免震層										
KGIN																	
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	0.053	0.61	1.03	1/2068	0.08	0.01	0.08	許容変形以下	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.73	3.25	0.028	0.99	0.85	1/2010	0.05	0.06	0.17	許容変形以下	許容変形以下
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	0.017	0.92	0.41	1/4632	0.04	0.09	0.10	許容変形以下	許容変形以下
B-4	超高層 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	0.024	2.01	0.73	1/338	0.05	0.32	0.40	許容変形以下	許容変形以下
C-2	中高層 第3世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	0.053	0.63	1.15	1/1572	0.07	0.03	0.10	許容変形以下	許容変形以下
C-4	超高層 第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	0.028	1.39	1.09	1/384	0.05	0.15	0.24	許容変形以下	許容変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	0.032	0.64	1.22	1/1340	0.05	0.04	0.10	許容変形以下	許容変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB-OD	Y	3.45	6.43	0.016	0.39	0.82	1/277	0.06	0.34	0.45	許容変形以下	許容変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	0.035	0.61	0.94	1/1952	0.04	0.04	0.10	許容変形以下	許容変形以下
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	X	0.68	2.56	0.068	0.53	0.89	1/1968	0.06	0.03	0.10	許容変形以下	許容変形以下
E-3	超高層 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	0.024	2.07	0.80	1/343	0.06	0.37	0.41	許容変形以下	許容変形以下
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	0.039	0.60	0.86	1/2137	0.04	0.03	0.10	許容変形以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S-CFT	NR+SL	Y	1.81	4.30	0.040	1.48	1.42	1/300	0.06	0.13	0.21	許容変形以下	許容変形以下
F-4	超高層 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	X	3.49	5.55	0.032	0.95	0.80	1/479	0.04	0.12	0.20	許容変形以下	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	0.041	1.26	0.56	1/863	0.06	0.20	0.26	許容変形以下	許容変形以下
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	0.094	1.31	0.54	1/1094	0.05	0.12	0.15	許容変形以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	0.042	0.58	0.66	1/5952	0.06	0.03	0.09	許容変形以下	許容変形以下
H-4	超高層 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	Y	1.82	4.02	0.035	1.06	1.33	1/755	0.05	0.05	0.11	許容変形以下	許容変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	0.030	0.63	0.62	1/4653	0.06	0.04	0.14	許容変形以下	許容変形以下
I-2	中高層 第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	0.036	0.81	0.92	1/2434	0.06	0.05	0.15	許容変形以下	許容変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	0.017	1.29	0.66	1/1962	0.04	0.10	0.16	許容変形以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	0.043	0.54	0.83	1/3091	0.05	0.04	0.12	許容変形以下	許容変形以下
K-1	中高層 第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	0.039	0.69	1.16	1/1034	0.05	0.04	0.11	許容変形以下	許容変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	0.032	1.26	0.58	1/3749	0.04	0.13	0.14	許容変形以下	許容変形以下
SZO024																	
記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	解析方向	基礎 固定	200% ひずみ時	αy <td>Ve (m/s) <td>最大加速度 (m/s<sup>2</sup>) <td>最大閉間 変形角</td> <td>ベースシニア 係数</td> <td>状態</td> <td>最大変位 (m) <td>免震層 最大速度 (m/s) <td>状態</td> </td></td></td></td>	Ve (m/s) <td>最大加速度 (m/s<sup>2</sup>) <td>最大閉間 変形角</td> <td>ベースシニア 係数</td> <td>状態</td> <td>最大変位 (m) <td>免震層 最大速度 (m/s) <td>状態</td> </td></td></td>	最大加速度 (m/s <sup>2</sup> ) <td>最大閉間 変形角</td> <td>ベースシニア 係数</td> <td>状態</td> <td>最大変位 (m) <td>免震層 最大速度 (m/s) <td>状態</td> </td></td>	最大閉間 変形角	ベースシニア 係数	状態	最大変位 (m) <td>免震層 最大速度 (m/s) <td>状態</td> </td>	免震層 最大速度 (m/s) <td>状態</td>	状態
A-1	低層 第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	Y	0.41	1.77	0.053	3.00	3.42	1/136	0.20	0.14	0.65	許容変形以下	許容変形以下
A-3	中高層 第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	X	0.73	3.25	0.028	2.21	2.67	1/707	0.11	0.38	0.57	許容変形以下	限界変形以下
B-3	低層 第3世代	13.0	2000	RC	NR+SL+オイルD	X	0.22	3.36	0.017	2.55	1.03	1/5936	0.10	0.27	0.44	許容変形以下	許容変形以下
B-4	超高層 第3世代	121.0	2006	RC	NR+SL+オイルD	X	3.16	6.19	0.024	1.43	1.83	1/268	0.04	0.28	0.36	許容変形以下	許容変形以下
C-2	中高層 第3世代	36.1	1994	SRC.S	LRB	X	0.82	2.99	0.053	3.10	3.00	1/656	0.17	0.29	0.67	許容変形以下	許容変形以下
C-4	超高層 第3世代	88.5	2008	RC	LRB+NR	X	2.27	4.93	0.028	2.51	3.26	1/216	0.07	0.27	0.46	許容変形以下	許容変形以下
D-2	中高層 第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	Y	0.86	3.45	0.032	2.31	2.83	1/406	0.09	0.35	0.54	許容変形以下	許容変形以下
D-4	中高層 第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB-OD	Y	3.45	6.43	0.016	1.40	1.62	1/238	0.04	0.19	0.28	許容変形以下	許容変形以下
E-1	中高層 第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	X	0.79	3.40	0.035	2.48	1.88	1/420	0.11	0.33	0.53	許容変形以下	許容変形以下
E-2	中高層 第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	X	0.68	2.56	0.068	2.70	2.42	1/240	0.13	0.18	0.46	許容変形以下	許容変形以下
E-3	超高層 第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	X	1.78	5.24	0.024	1.72	1.99	1/319	0.06	0.36	0.59	許容変形以下	許容変形以下
E-4	中高層 第3世代	34.0	2004	RC	LRB	X	0.87	3.87	0.039	2.36	2.11	1/570	0.09	0.31	0.53	許容変形以下	許容変形以下
F-3	中高層 第3世代	31.1	2006	S-CFT	NR+SL	Y	1.81	4.30	0.040	2.15	3.12	1/305	0.09	0.37	0.60	許容変形以下	許容変形以下
F-4	超高層 第3世代	139.6	2006	RC+Pca	NR+SL	X	3.49	5.55	0.032	1.90	3.21	1/235	0.05	0.16	0.34	許容変形以下	許容変形以下
G-3	中高層 第3世代	28.7	1997	CFT+S	NR+オイルD	Y	1.32	4.03	0.041	1.98	1.27	1/440	0.10	0.34	0.59	許容変形以下	限界変形以下
G-4	中高層 第3世代	24.2	2001	S	NR+オイルD	Y	1.04	3.57	0.094	2.40	2.34	1/449	0.12	0.25	0.42	許容変形以下	許容変形以下
H-1	低層 第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	Y	0.27	2.23	0.042	0.93	1.69	1/1960	0.17	0.28	0.66	許容変形以下	許容変形以下
H-4	超高層 第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	Y	1.82	4.02	0.035	2.23	3.37	1/340	0.10	0.43	0.80	許容変形以下	限界変形以下
I-1	中高層 第2世代	31.3	1996	RC	HDR	X	0.50	3.04	0.030	2.91	2.26	1/1033	0.20	0.33	0.53	許容変形以下	許容変形以下
I-2	中高層 第2世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	Y	0.98	3.53	0.036	2.32	2.47	1/1119	0.12	0.38	0.58	許容変形以下	許容変形以下
J-1	中高層 第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+オイルD+鋼D	X	1.10	4.27	0.017	2.06	1.72	1/888	0.10	0.38	0.58	許容変形以下	許容変形以下
J-3	中高層 第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	X	0.59	3.90	0.043	2.45	2.16	1/654	0.09	0.28	0.48	許容変形以下	許容変形以下
K-1	中高層 第3世代	60.0	2001	RC	NR+LRB+鋼D	X	1.05	3.67	0.039	2.18	1.85	1/327	0.10	0.26	0.53	許容変形以下	許容変形以下
K-2	中高層 第3世代	56.6	2010	RC	LRB+NR+SL+CLB+OD	X	0.97	4.85	0.032	2.43	2.20	1/1223	0.07	0.33	0.48	許容変形以下	許容変形以下

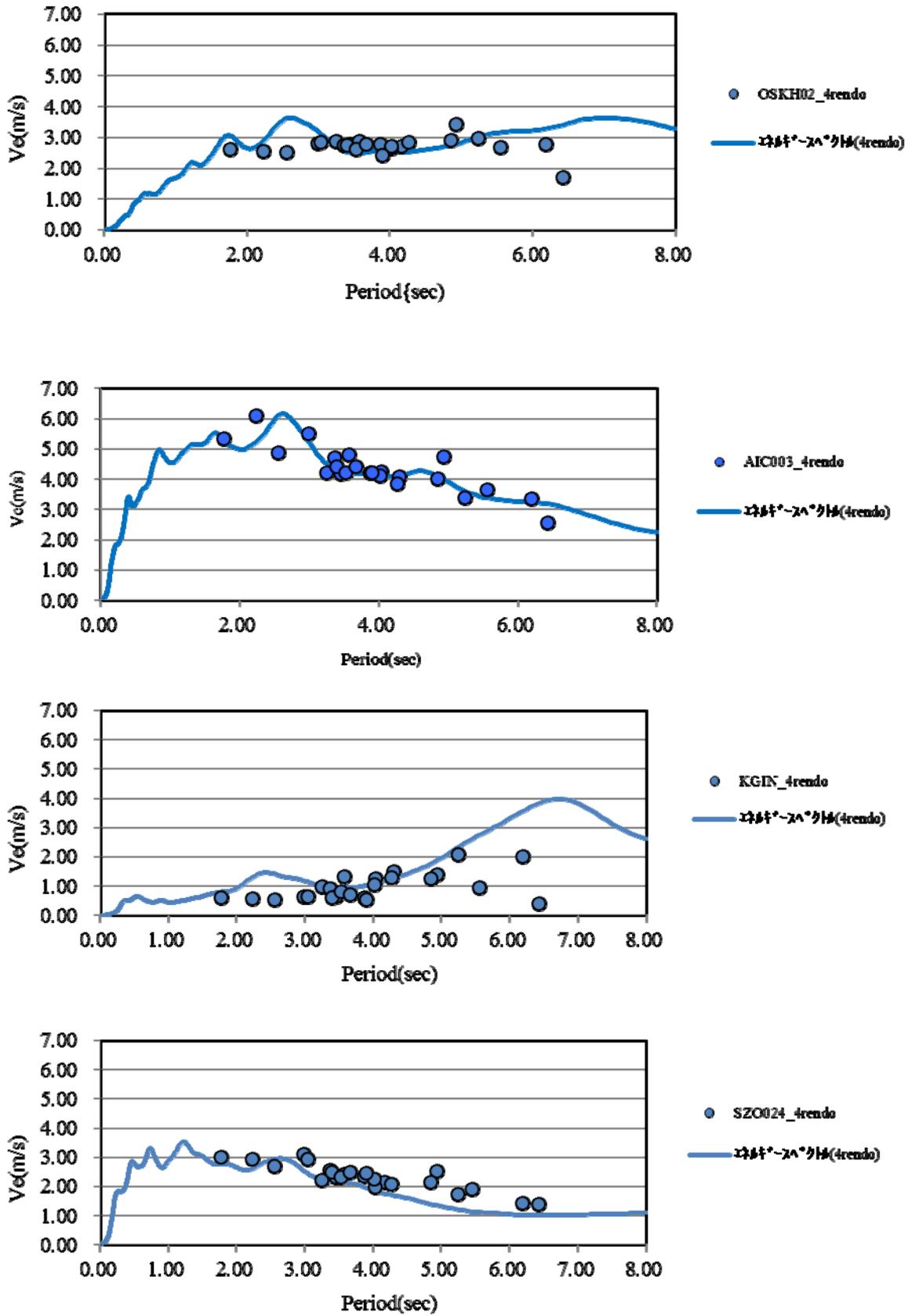


図 4.3-1 エネルギーの速度換算値

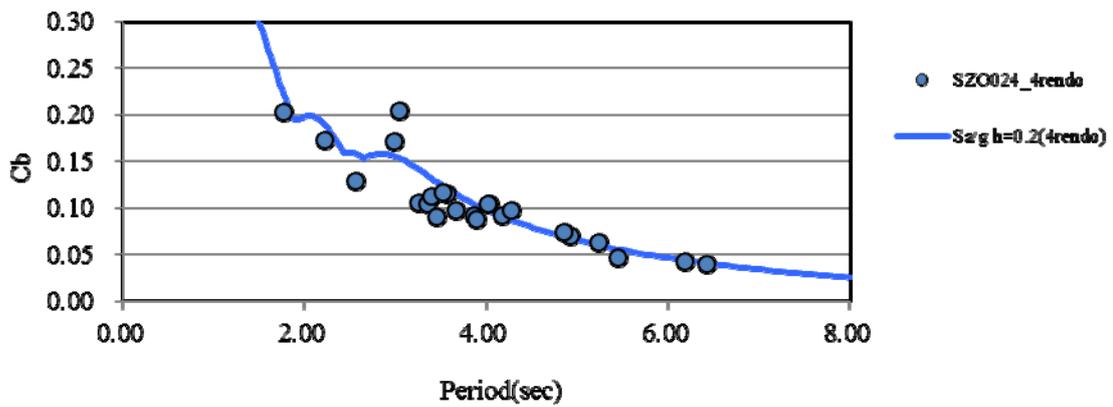
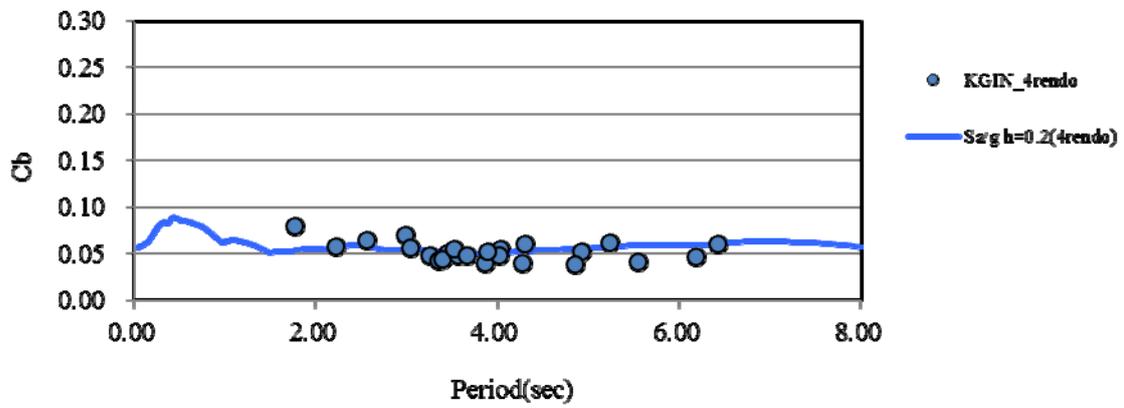
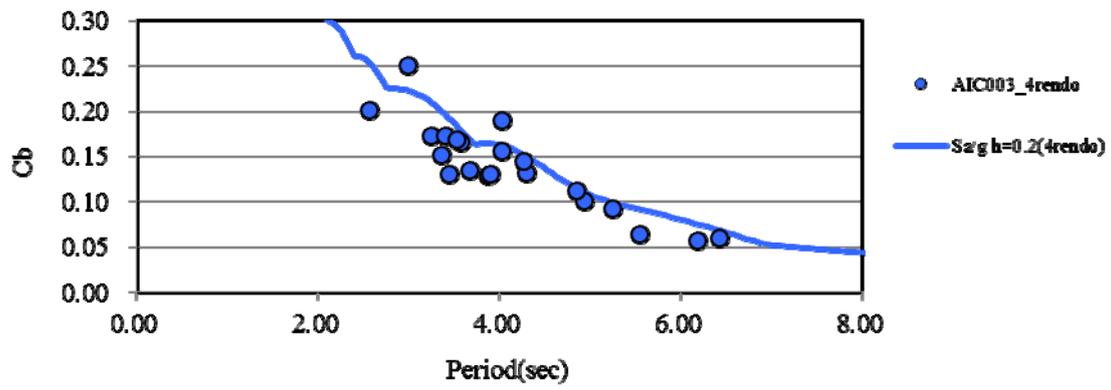
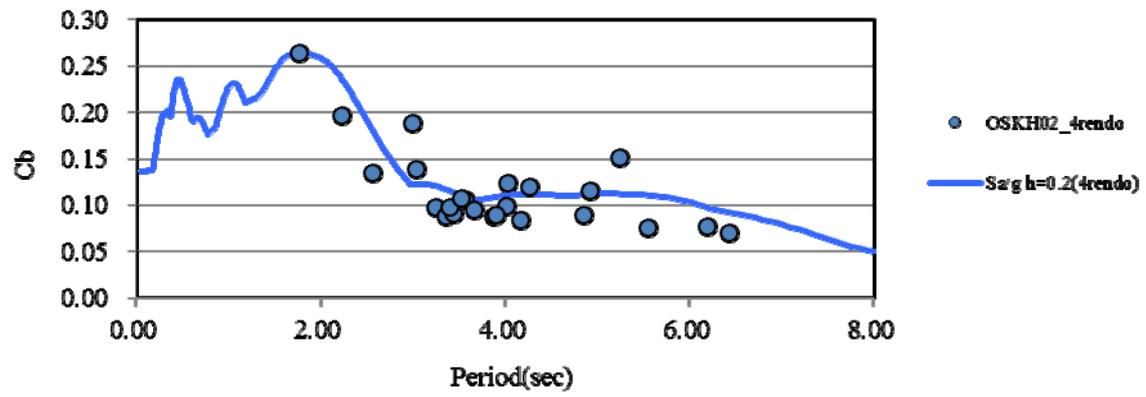


図 4.3-2 上部構造のベースシア係数

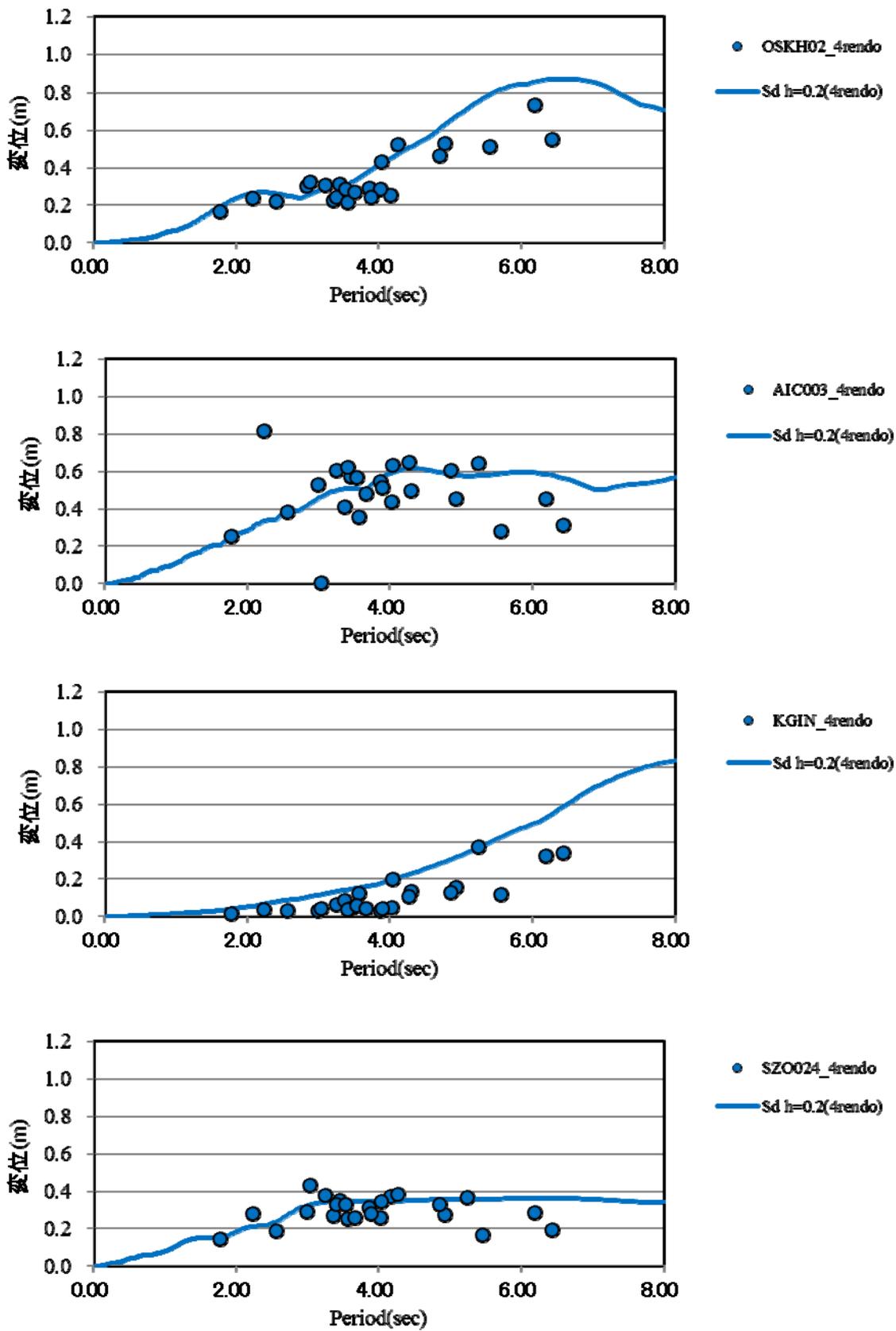


図 4.3-3 免震層の応答変位

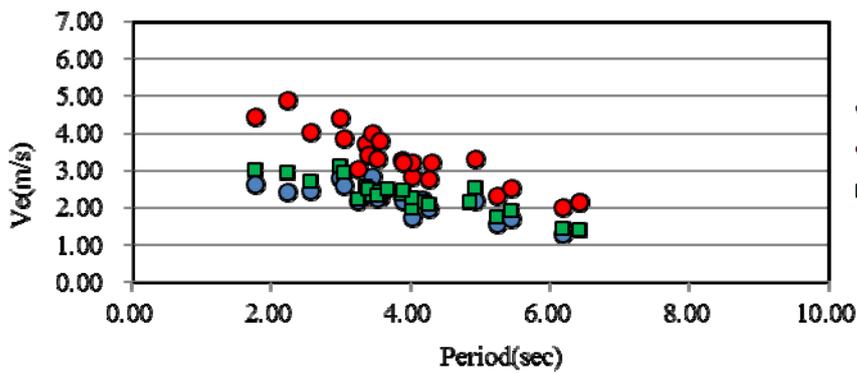
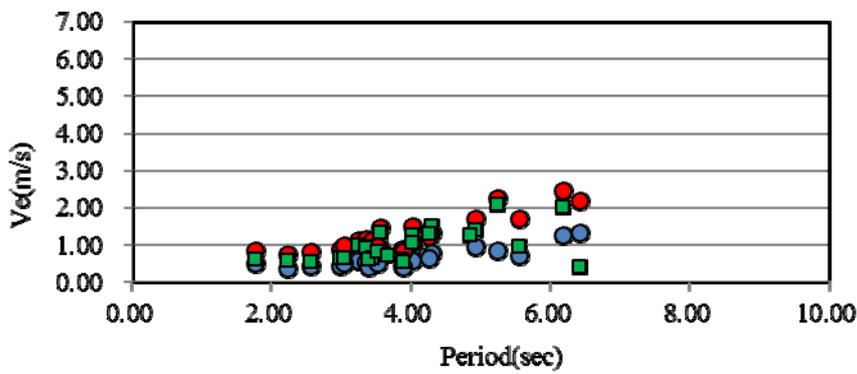
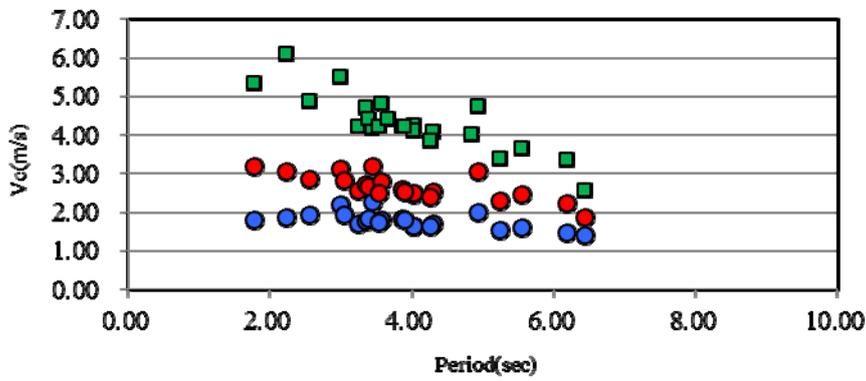
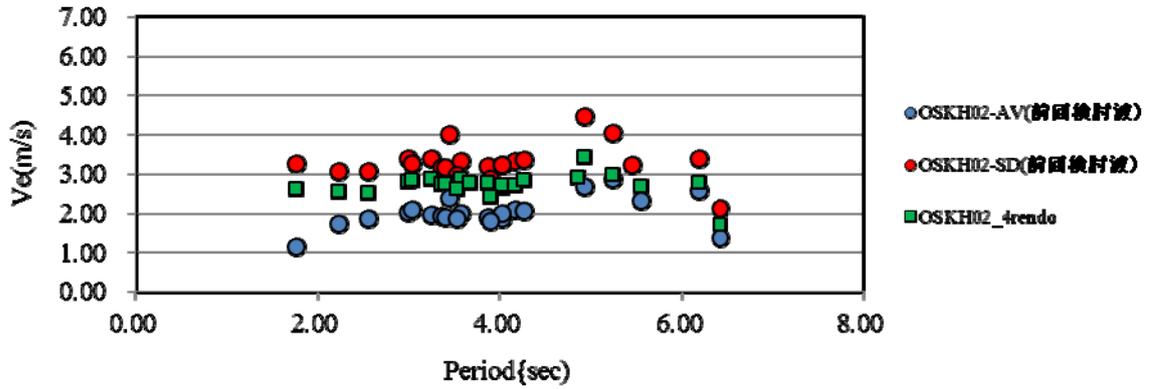


図 4.3-4 エネルギーの速度換算値の前回との比較

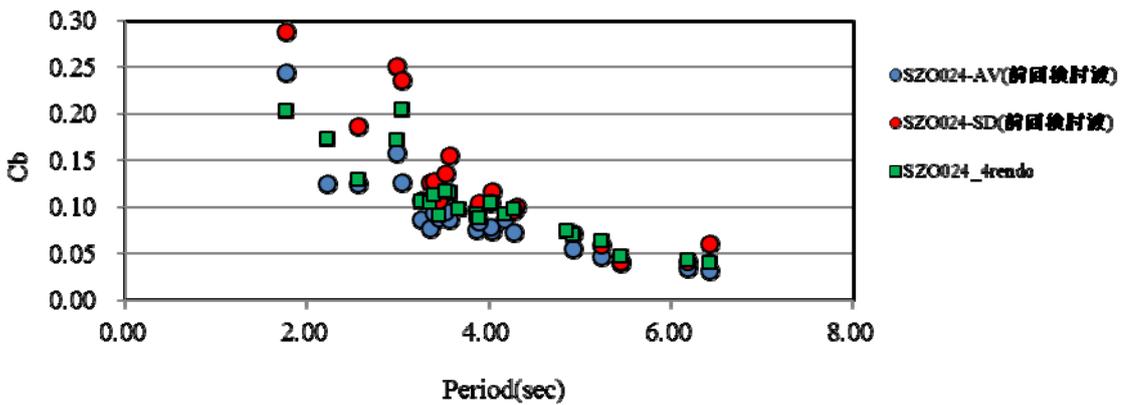
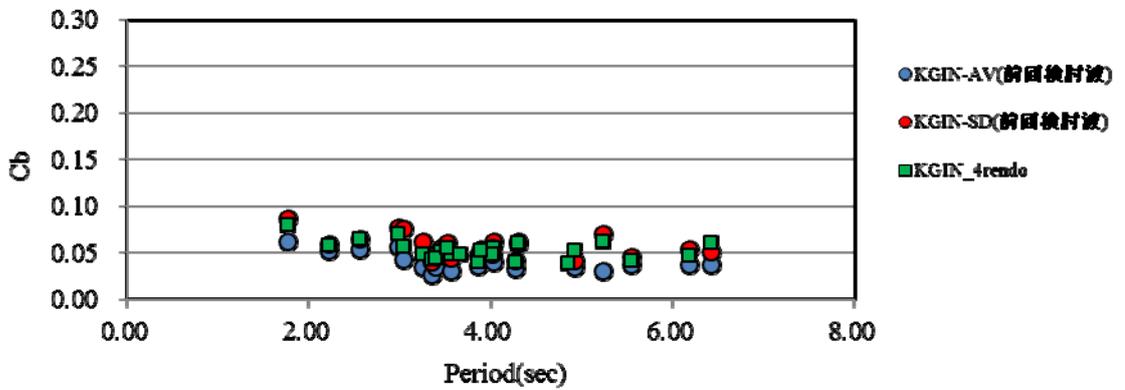
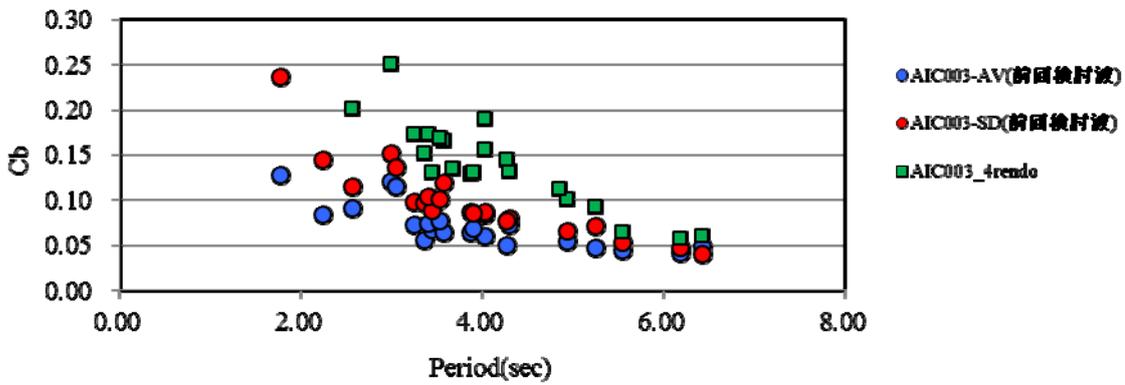
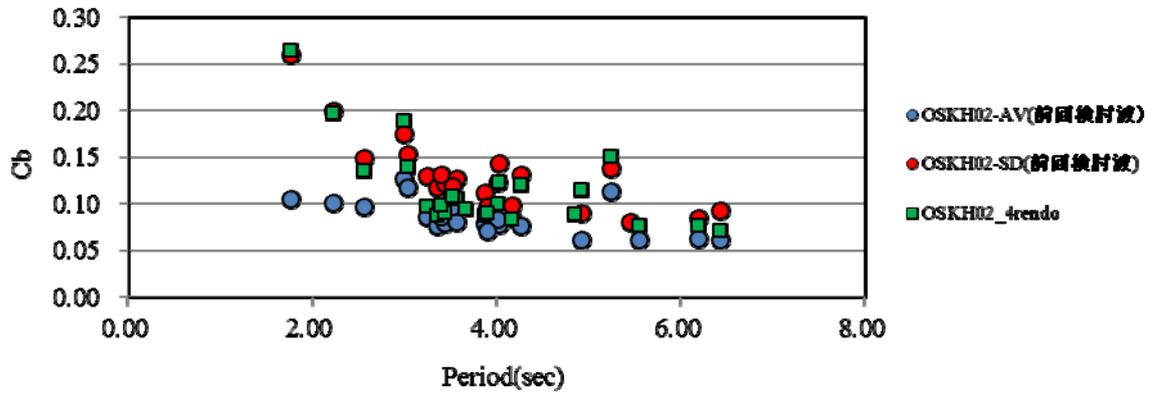


図 4.3-5 上部構造のベースシア係数の前回との比較

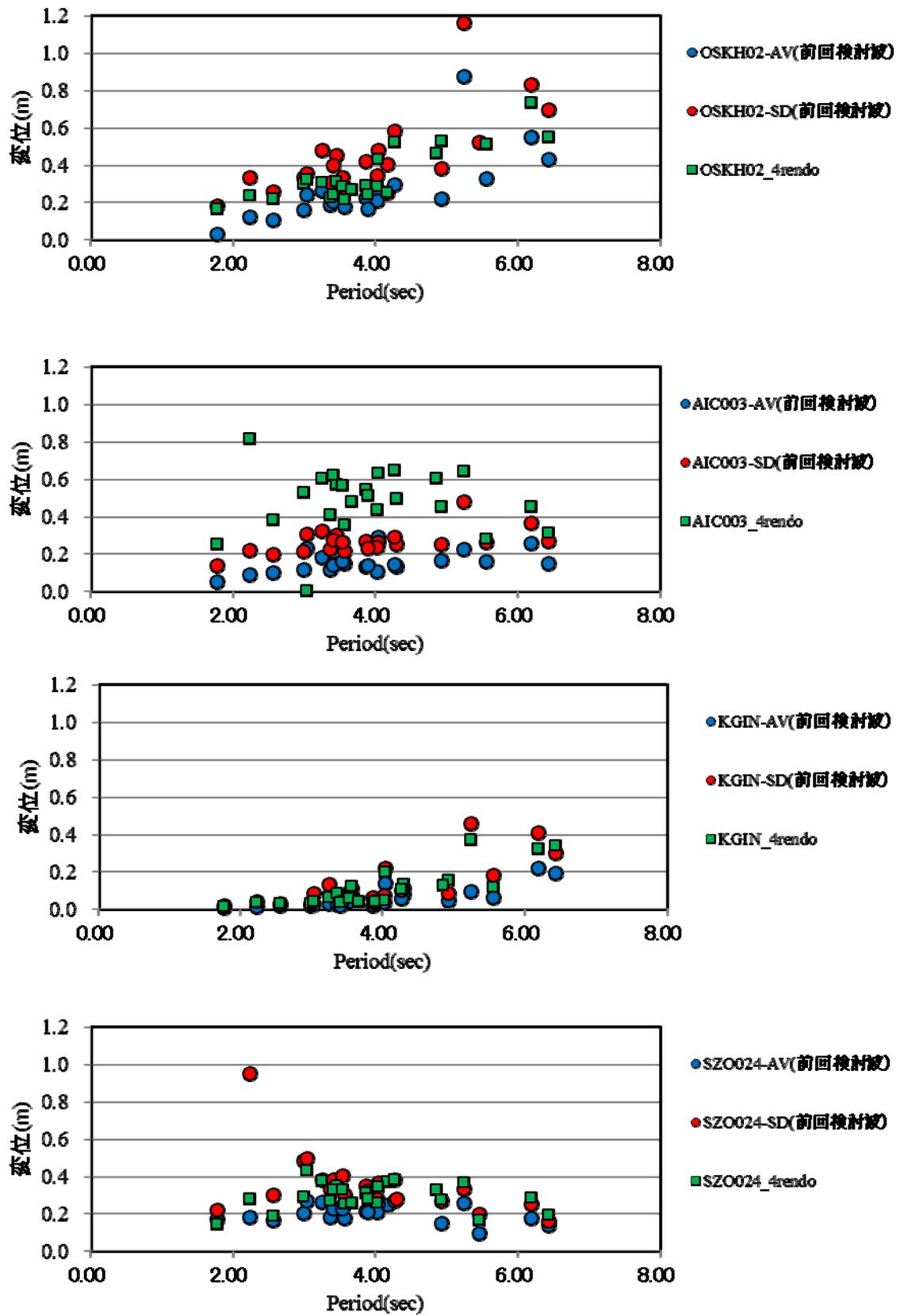


図 4.3-6 免震層の応答変位の前回との比較

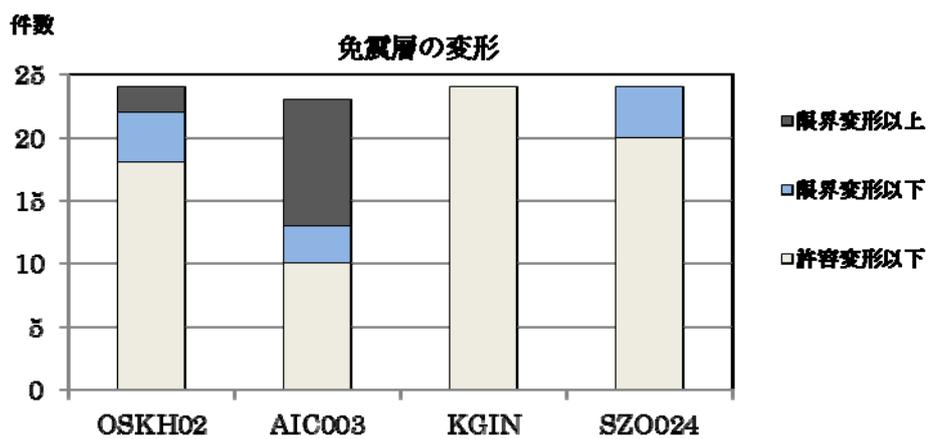
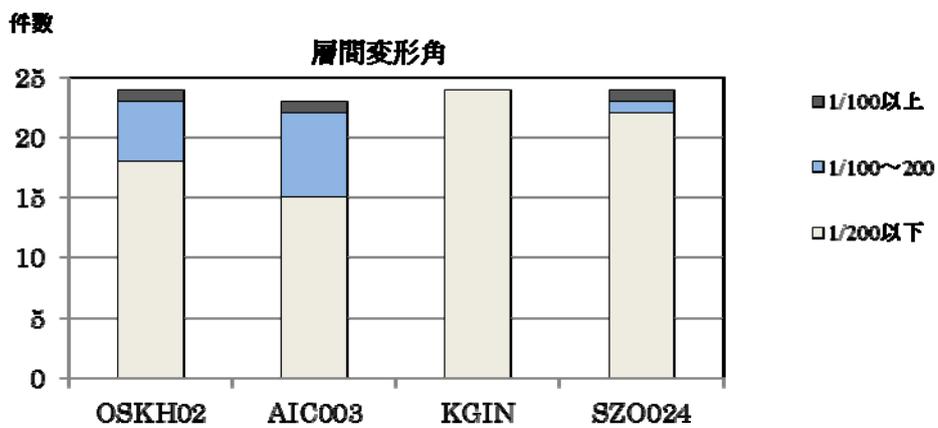
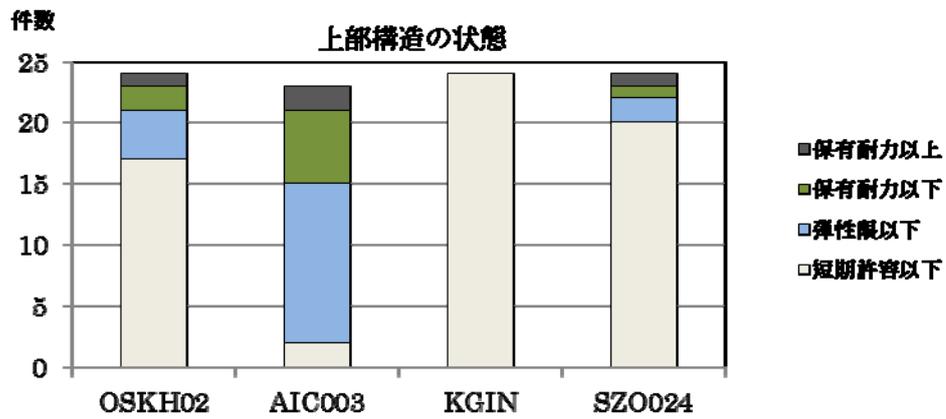


図 4.3-7 上部構造の状態、層間変形角および免震層の状態

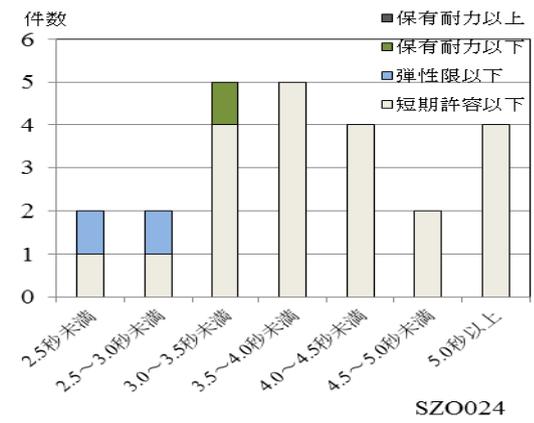
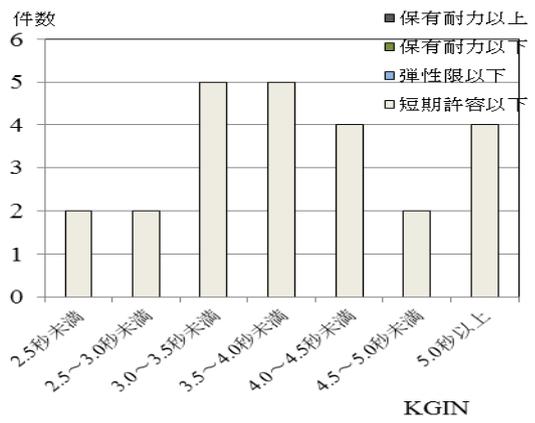
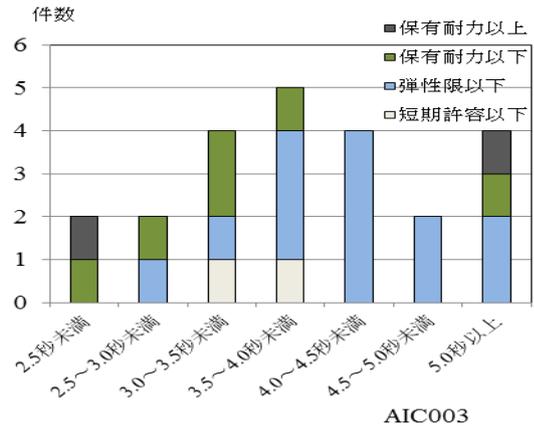
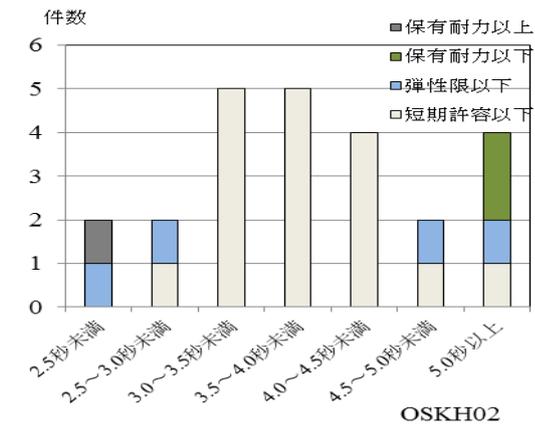


図 4.3-8 固有周期ごとの上部構造の状態

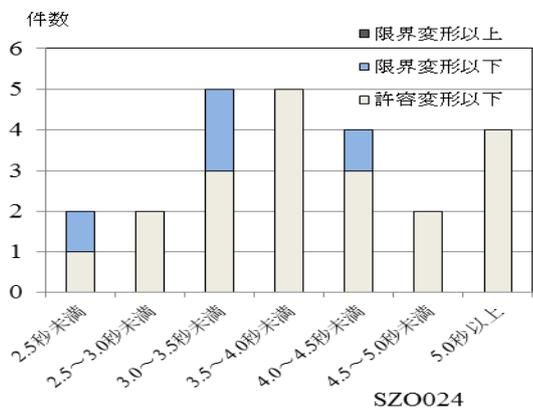
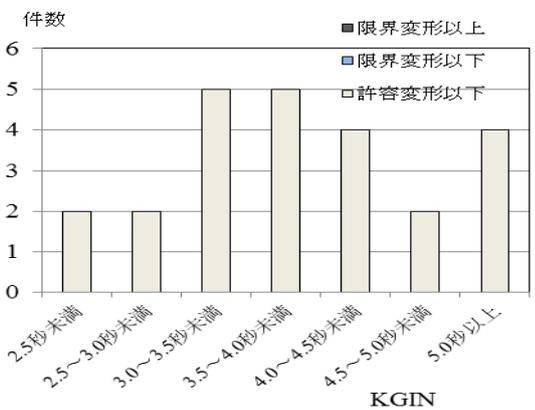
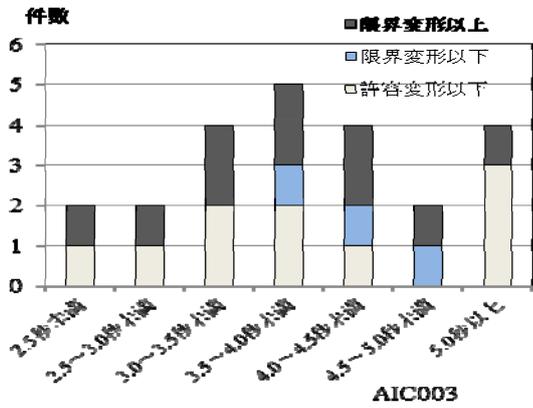
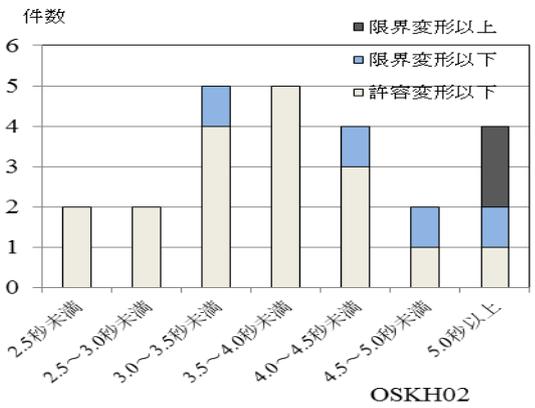


図 4.3-9 固有周期ごとの免震層の状態

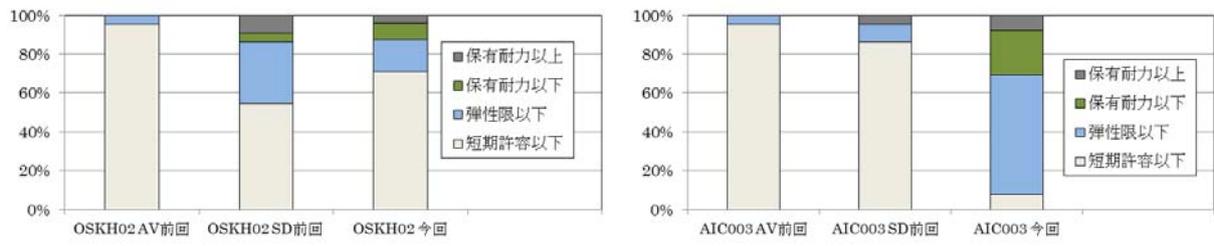


図 4.3-10 上部構造の状態の前回との比較

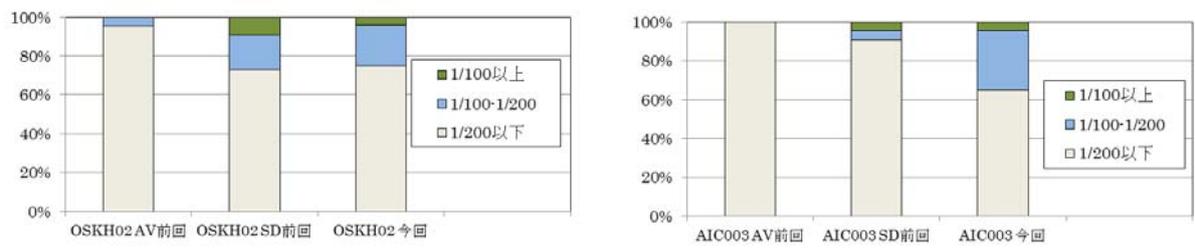


図 4.3-11 上部構造の層間変形角の前回との比較

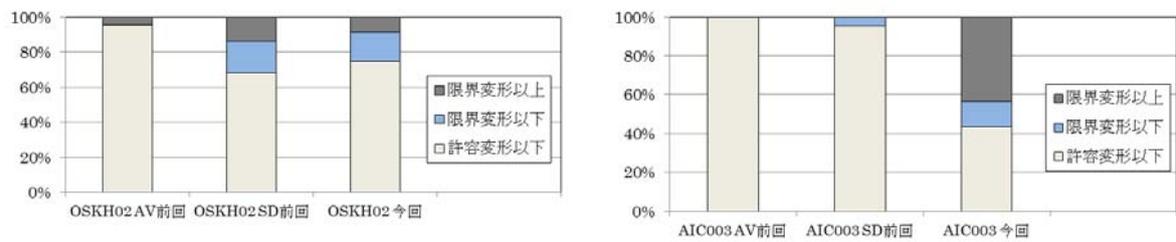


図 4.3-12 免震層の状態の前回との比較

#### 4.4 エネルギー吸収に関する検討

長周期地震動は非常に継続時間が長く、免震部材で吸収するエネルギーは非常に大きくなる。これまでの知見では免震部材に長時間の繰返し変形が作用すると温度上昇を生じ、剛性や減衰性能が変動することが明らかになっている。また、履歴系のダンパーでは金属疲労によるクラックや破壊が生じる可能性もある。ここでは、モデル建物の免震部材が吸収したエネルギーを把握し、免震部材の状態に関して考察する。

##### (1) モデル建物の免震部材の吸収エネルギー量

検討にあたっては、建物モデル 24 棟の中から、すべての種類の免震部材を網羅できるように 12 棟を選択し、検討を行った。

これらの建物について、免震層の最大変位、最大速度、総変位距離、総吸収エネルギーを求めたほか、各免震部材ごとに吸収エネルギーや累積塑性変形などのエネルギー吸収に係わると思われる値を求めた。エネルギー吸収に係わる指標として、鉛プラグ入り積層ゴムでは、吸収エネルギー  $E$  を鉛プラグの体積  $V_p$  で除した  $E/V_p$  とした。高減衰積層ゴムは  $E$  をゴム体積  $V_r$  で除した  $E/V_r$  とした。また、すべり支承では総滑動距離、鋼材ダンパーや鉛ダンパーでは 1 台あたりの吸収エネルギー  $E$  の他に、累積塑性変形を求めた。オイルダンパーに関しては吸収エネルギー  $E$  とダンパーの鉄部の重量を示した。免震層の総変位距離に関しては、解析終了時（地震動継続時間 720 秒）のものと、免震層の吸収エネルギーが最終値の 95% になる時点のものを示した。これは、主要動の後の小さい揺れが継続する際に、履歴系のダンパーは弾性範囲となり減衰がなくなるために、弾性変形が長時間継続することにより総変位距離が大きくなってしまい、解析終了時の総変位距離は値としてあまり意味をなさないと思われることによる。

表 4.4-1 にエネルギー吸収量を一覧表にまとめたものを示す。図 4.4-1～図 4.4-6 に各免震部材ごとの単位体積あたりや 1 台あたりの吸収エネルギーを示す

LRB の鉛単位体積あたりの吸収エネルギーは AIC003 では非常に大きく、最大で  $1121\text{N/mm}^2$  でありほとんどが  $800\text{N/mm}^2$  以上である。OSKH02 でも  $400\sim 600\text{N/mm}^2$  となっている。

高減衰積層ゴムのゴム単位体積あたりの吸収エネルギーは AIC003 では  $41\text{N/mm}^2$  と非常に大きく（I-2 棟は解析不能）、OSKH02 では  $15\sim 20\text{N/mm}^2$  程度となっている。

弾性すべり支承の総すべり距離は AIC003 では最大 30.2m と大きく、OSKH02 では 10m 程度となっている。

鋼材ダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 6,473kNm と非常に大きく、OSKH02 では 3,000kNm 程度となっている。

鉛ダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 5,261kNm と非常に大きく、OSKH02 では 1,000～2,000kNm 程度となっている。

オイルダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 では最大 75,292kNm と非常に大きく、OSKH02 では最大 40,000kNm 程度となっている。

表 4.4-1 エネルギー検討結果の一覧

記号	分類	軒高 (m)	免震システム	固有周期 (s)		α	地震動	免震層の総 吸収E <sub>v</sub> (kNm)	V <sub>e</sub> (m/s)	最大変位 (m)	総変位距離 (m)	E95%時 総変位量 (m)	LRB E/Vp (N/mm <sup>2</sup> )	HDR E/Vr (N/mm <sup>2</sup> )	滑り支承 総すべり 距離(m)	鋼材D E/台 (kNm)	鉛D E/台 (kNm)	オイルD E/台 (kNm)			
				基礎 固定	200% ひずみ																
A-3	中高層 第3世代	34.6	HDR+NR	0.73	3.25	0.028	OSKH02	2.00E+05	2.87	0.30	30.6	22.8		18.9							
							AIC003	4.33E+05	4.22	0.60	55.3	44.6		41.0							
							KGIN	2.34E+04	0.99	0.07	7.7	6.3		2.2							
B-3	低層 第3世代	13.0	NR+SL +オイル D	0.22	3.36	0.017	OSKH02	7.17E+03	2.72	0.22	13.5	12.8			13.5			1.637			
							AIC003	2.14E+04	4.69	0.41	30.2	27.9		30.2						6.328	
							KGIN	8.18E+02	0.92	0.09	2.1	2.0		2.1						109	
C-4	超高層 第3世代	88.5	HDR+NR	2.27	4.39	0.028	SZ0024	6.30E+03	2.55	0.27	10.3	9.9			10.3			1.667			
							OSKH02	7.47E+04	3.41	0.53	16.9	13.9		134.0							
							AIC003	1.44E+05	4.73	0.45	30.9	25.7		259.0							
D-2	中高層 第3世代	29.9	LRB+NR	0.86	3.45	0.032	KGIN	9.97E+03	1.39	0.15	7.7	2.0									
							SZ0024	3.26E+04	2.51	0.27	15.7	8.3		59.0							
							OSKH02	1.20E+05	2.78	0.31	26.8	19.2		348.9							
E-2	中高層 第2世代	26.1	NR+鋼棒 D +鉛D	0.68	2.56	0.068	AIC003	2.70E+05	4.18	0.57	44.6	36.6					596	679			
							KGIN	5.49E+05	0.64	0.04	7.37	5.1		15.9							
							SZ0024	7.93E+05	2.31	0.35	22.1	12.0		230.2							
F-3	中高層 第3世代	31.1	NR+SL	1.81	4.30	0.040	OSKH02	8.33E+03	2.51	0.22	15.5	11.4				2.911	2.008				
							AIC003	3.15E+04	4.86	0.38	35.4	27.6									
							KGIN	3.01E+02	0.53	0.03	5.1	3.9									
G-4	中高層 第3世代	24.2	NR +オイル D	1.04	3.57	0.094	SZ0024	8.51E+03	2.70	0.18	18.4	14.1				663	648				
							OSKH02	3.52E+04	2.69	0.25	27.3	25.9									
							AIC003	7.38E+04	4.06	0.50	46.0	43.7									
H-4	超高層 第3世代	60.4	NR+鉛D +鋼D	1.82	4.02	0.035	KGIN	8.98E+03	1.48	0.13	17.8	16.9									
							SZ0024	2.08E+04	2.15	0.37	29.2	27.8									
							OSKH02	1.25E+05	2.87	0.21	27.2	21.8									
I-1	中低層 第2世代	31.3	HDR	0.50	3.04	0.030	AIC003	3.51E+05	4.82	0.35	43.5	34.0					2.768	2.341			
							KGIN	2.62E+04	1.31	0.12	14.3	12.3									
							SZ0024	8.69E+04	2.40	0.25	18.4	12.9									
J-1	中高層 第2世代	44.3	NR+CLB +オイルD +鋼D	1.10	4.27	0.020	OSKH02	5.32E+04	0.04	0.28	16.5	13.1				2.768	2.341				
							AIC003	1.23E+05	0.08	0.44	34.1	29.1									
							KGIN	6.54E+03	0.01	0.05	6.1	4.8									
K-1	中高層 第3世代	59.99	NR+LRB +鋼D	1.05	3.67	0.039	SZ0024	3.63E+04	0.02	0.26	16.4	13.4				1.339	1.342				
							OSKH02	3.43E+04	2.82	0.32	47.3	23.1									
							AIC003	1.64E+03	0.63	0.5以上											
K-2	中高層 第3世代	56.59	LRB+NR +SL+CLB +OD	0.97	4.85	0.032	KGIN	3.46E+04	2.91	0.04	24.4	22.4									
							SZ0024	4.31E+05	2.85	0.52	30.7	23.3									
							OSKH02	7.87E+05	3.85	0.65	48.7	41.7									
L-1	中高層 第3世代	56.59	NR+LRB +鋼D	1.05	3.67	0.039	KGIN	8.88E+04	1.29	0.10	14.1	11.6									
							SZ0024	2.25E+05	2.06	0.38	21.6	16.2									
							OSKH02	1.48E+05	2.76	0.27	22.5	17.0									
M-1	中高層 第3世代	56.59	LRB+NR +SL+CLB +OD	0.97	4.85	0.032	AIC003	3.76E+05	4.40	0.48	39.4	32.7				6.415	5.261				
							KGIN	9.37E+03	0.69	0.04	5.5	3.8									
							SZ0024	1.20E+05	2.48	0.26	19.3	13.5									
N-1	中高層 第3世代	56.59	LRB+NR +SL+CLB +OD	0.97	4.85	0.032	OSKH02	1.92E+05	2.89	0.46	26.9	20.3				2.964	2.964				
							AIC003	3.71E+05	4.02	0.61	42.4	35.6									
							KGIN	3.62E+04	1.26	0.13	9.9	8.1									
O-1	中高層 第3世代	56.59	LRB+NR +SL+CLB +OD	0.97	4.85	0.032	SZ0024	1.04E+05	2.13	0.33	19.4	12.8									
							OSKH02	3.43E+04	2.82	0.32	47.3	23.1									
							AIC003	1.64E+03	0.63	0.5以上											

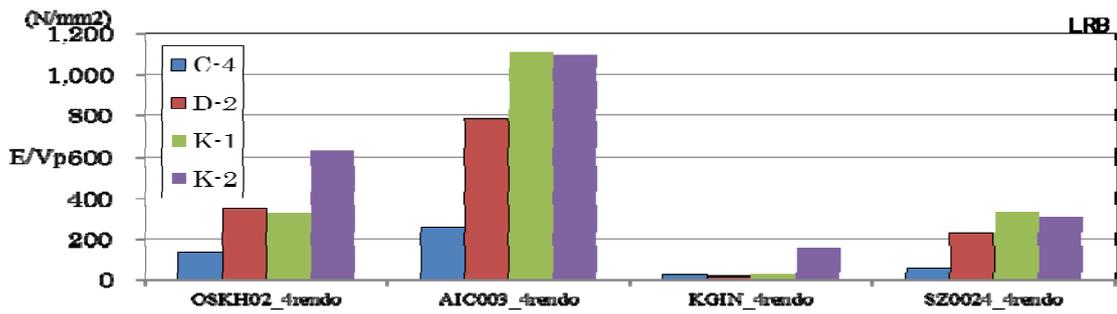


図 4.4-1 LRB のエネルギー吸収量

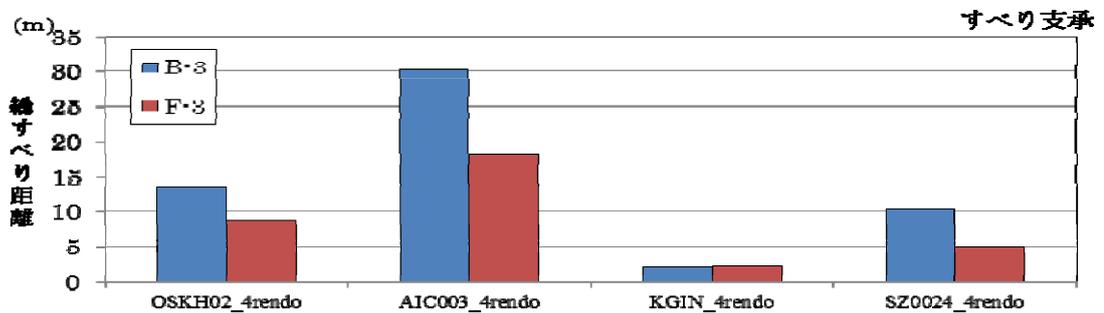
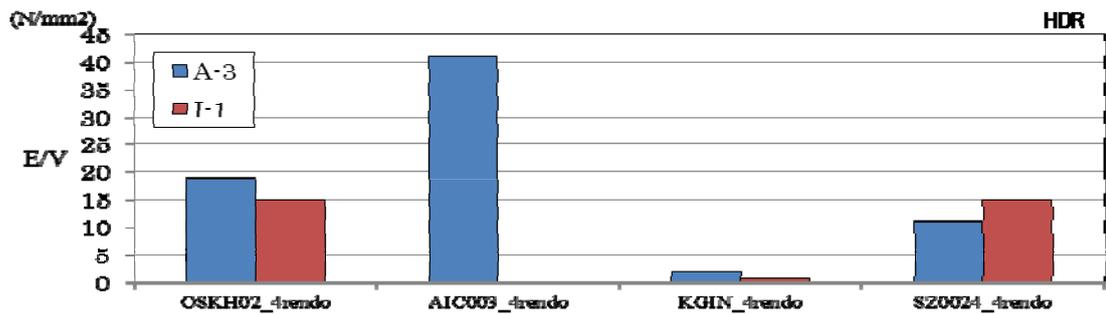


図 4.4-3 すべり支承の総すべり量

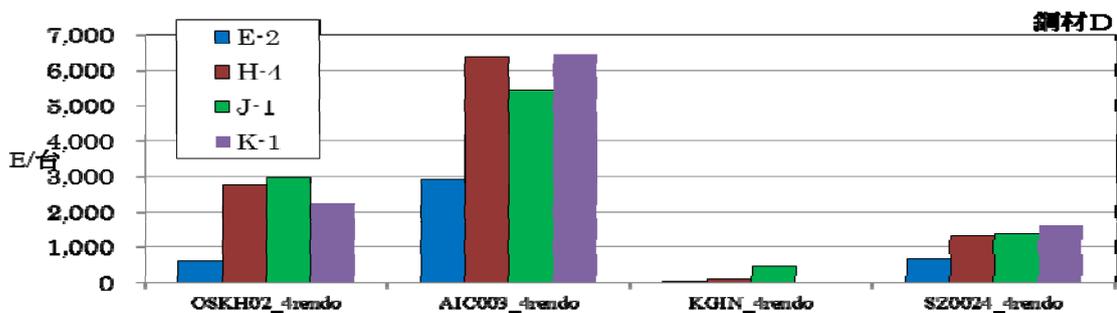


図 4.4-4 鋼材ダンパーのエネルギー吸収量

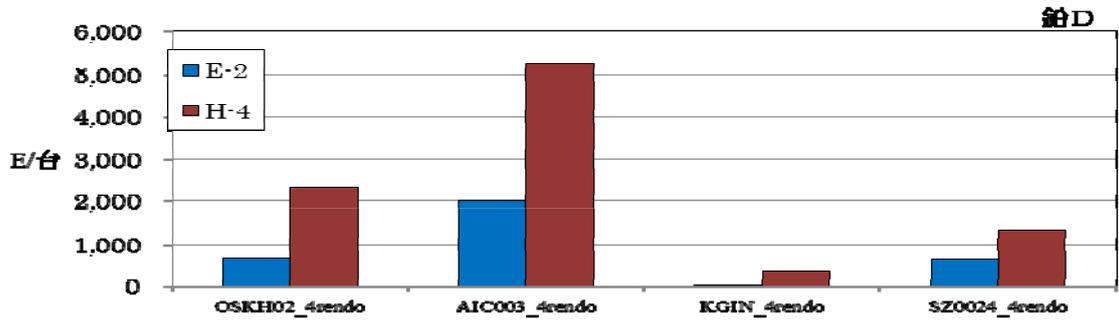


図 4.4-5 鉛ダンパーのエネルギー吸収量

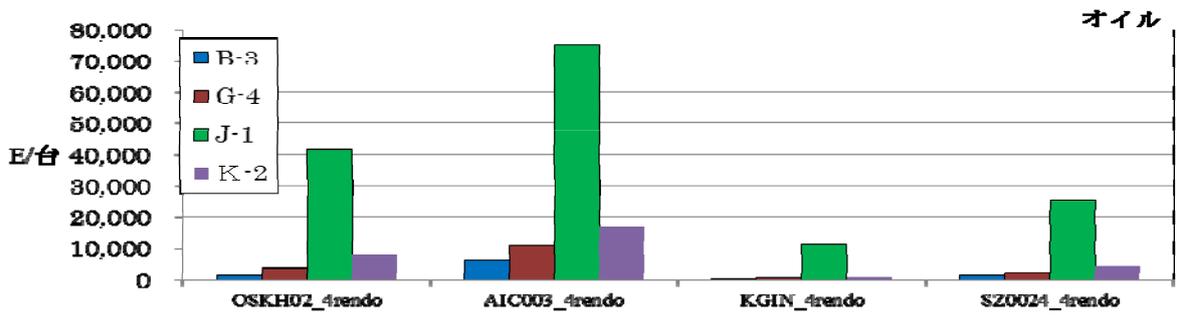


図 4.4-6 オイルダンパーのエネルギー吸収量

(2) 免震部材の吸収エネルギー量に対する考察

1) 鉛プラグ入り積層ゴム

既往の実験によると鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)は長周期地震動により、破損等の損傷が生じることはないと考えられるが繰り返し加力による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する。これまでの研究によると、降伏荷重の低下率  ${}_{LRB}k_{min}$  は LRB が吸収するエネルギー  ${}_{LRB}W_p$  を鉛プラグの体積  $V_p$  で除した  ${}_{LRB}W_p/V_p$  の関数として式 5.3-1 で評価できるとされている (T.Honma et al, 2010)。

$${}_{LRB}k_{min} = -0.06 + 1.25 \times \exp\left(-\frac{{}_{LRB}W_p}{V_p} \times \frac{1}{360}\right) \quad (4.4-1)$$

図 4.4-7 に実験結果と式 4.4-1 の比較を示す。なお、図中の(1)式は式 4.4-1 を意味する。

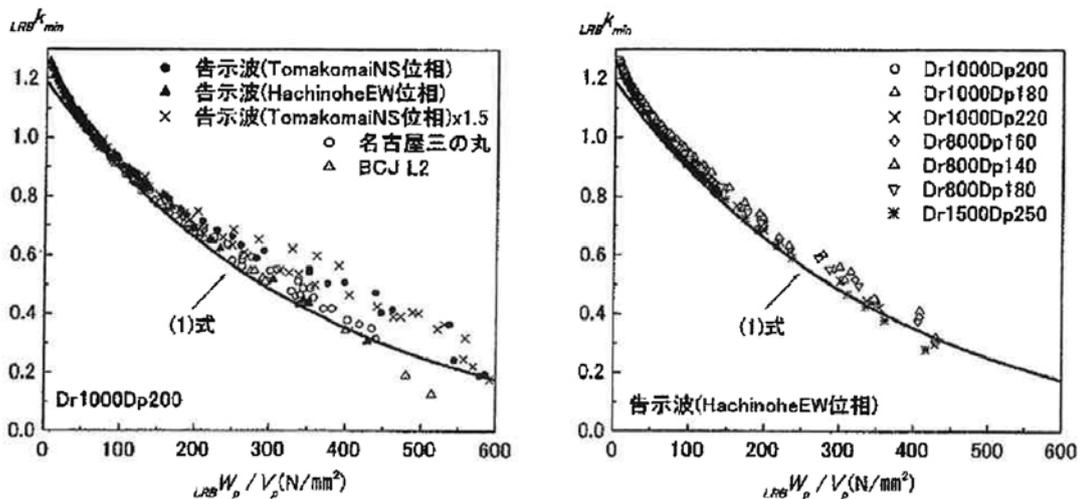


図 4.4-7  ${}_{LRB}k_{min}$  と  ${}_{LRB}W_p$  の関係

今回の解析において、鉛単位体積当たりの吸収エネルギーは AIC003 では最大  $1121\text{N/mm}^2$  で、図 4.4-1 に示されている実験の範囲を超えてしまっている。また、OSKH02 でも 4 棟中 3 棟は  $400\sim 600\text{N/mm}^2$  となっており、降伏荷重の低下率  ${}_{LRB}k_{min}$  は 0.2 程度になっている。このことから、AIC003 や OSKH02 では降伏荷重の低下を考慮すると変位はかなり大きくなると思われる。そこで、モデル建物 D-2 の降伏荷重の低下を考慮した検討を行った。

繰り返し加力による鉛プラグの温度上昇に伴い、LRB の降伏荷重が低下する特性を考慮した地震応答解析方法として、熱伝導解析を行いながら鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重  $Q_d$  を変化させながら行う手法がある (竹中他、2008)。また、簡便に応答変位の増大を予測する応答予測式も提案されている (嶺脇、2011) 他。以下にその 2 つの手法を用いた検討結果を示す

a) 熱伝導解析により降伏荷重が低下する特性を考慮した時刻歴応答解析

このモデル建物は 8 階建てだが、解析の都合で 1 質点系として検討した。鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径  $\phi 800\text{mm}$  とし、免震周期  $T_f$  やダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が 8

階建てモデルと同等になるように設定した。

表 4.4-2(a) 対象建物諸元

上部構造 重量 (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm <sup>2</sup> )	LRB φ 800 基数	Tf (sec)	α s
320600	13.6	49.4	4.84	0.033

Tf: ゴム剛性による免震周期  
α s: 鉛プラグ降伏せん断力係数

表 4.4-2 (b) 積層ゴム諸元 (1 基当たり)

ゴム種類	外径 (mm)	鉛径 (mm)	ゴム総厚 (mm)
G4	800	180	168

表 4.4-3、図 4.4-7 に鉛プラグの温度上昇による特性変化について非考慮とした場合、考慮した場合についての結果を示す。解析において初期温度は 15℃とした。

鉛プラグの温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した場合の免震層水平変位は、考慮しない場合と比較して 0.77~2.63 倍、免震層における吸収エネルギーは 0.86~1.40 倍となった。ただし愛知・津島での地震動 (AIC003) では温度上昇を考慮した場合の鉛プラグの温度上昇が実験で確認されている 200℃を超えているため解析対象範囲外と考えられる。

大阪・此花(OSKH02)の場合、入力地震動の周期特性として 4 秒以降 6 秒程度にかけて大きなピークを持つことから、温度上昇による降伏荷重の低下とそれに伴う周期変化における入力増大の相乗効果により応答値の増大率が大きくなったものと考えられる。非考慮の場合は許容変位以下となっているが、降伏荷重の低下を考慮すると限界変位を超えてしまっている。

表 4.4-3(a) 地震応答解析結果 (免震層水平変位)

入力 地震動	免震層水平変位(cm)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
OSKH02	28.5	74.8	2.63
AIC003	59.6	89.0*1	1.49*1
SZO024	32.9	38.6	1.17
KGIN	4.7	3.6	0.77

\*1 解析適用範囲外のため参考値

表 4.4-3 (b) 地震応答解析結果 (免震層吸収エネルギー)

入力 地震動	免震層吸収エネルギー(kN.m)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
OSKH02	1.141x10 <sup>5</sup>	1.602x10 <sup>5</sup>	1.40
AIC003	2.801x10 <sup>5</sup>	2.324x10 <sup>5</sup> *1	0.83*1
SZO024	9.222x10 <sup>4</sup>	8.917x10 <sup>4</sup>	0.97

KGIN	$5.643 \times 10^3$	$4.839 \times 10^3$	0.86
------	---------------------	---------------------	------

\*1 解析適用範囲外のため参考値

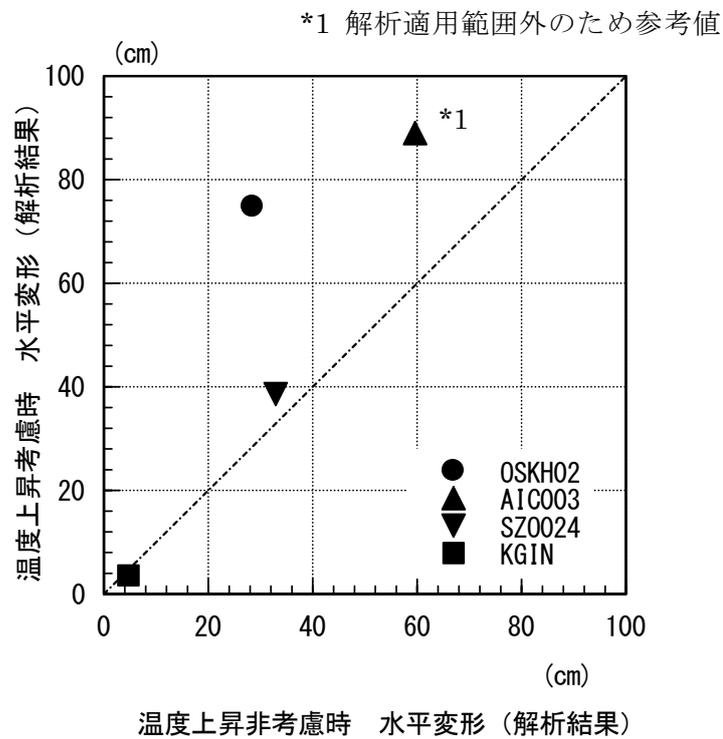
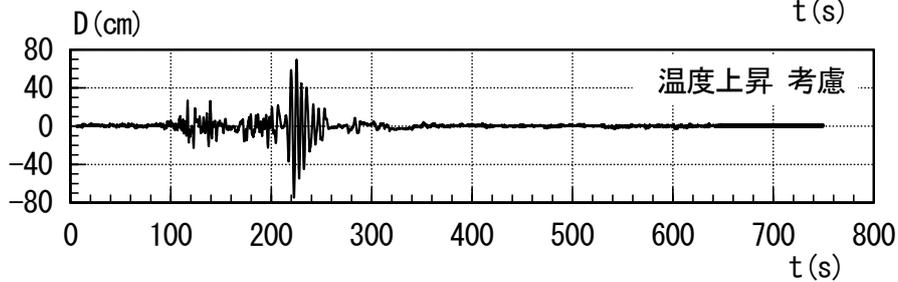
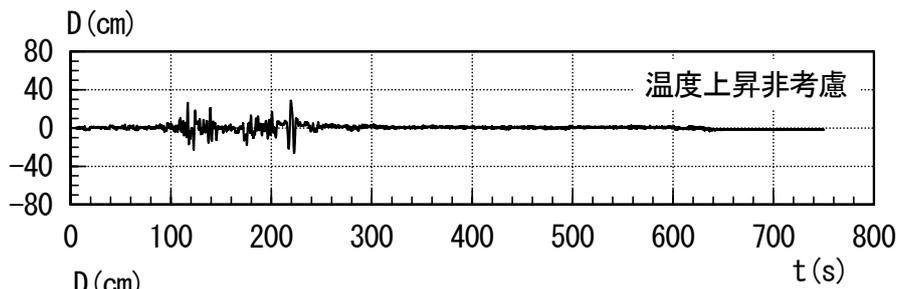


図 4.4-7 免震層水平変位解析結果

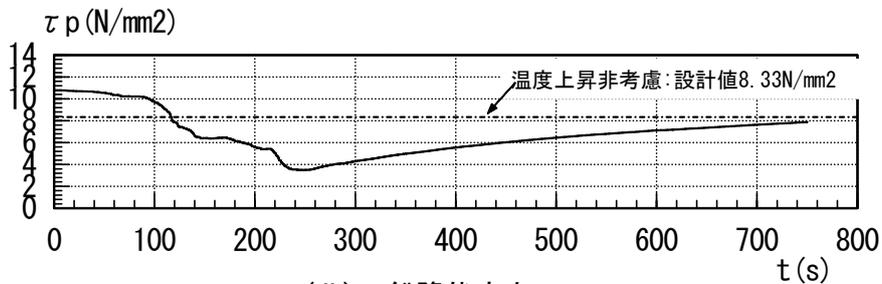
図 4.4-8(a)～図 4.4-8(d)に各入力地震動における解析結果を示す。

- 図 4.4.8(a) 地震応答解析結果(OSKH02)
- 図 4.4.8(b) 地震応答解析結果(AIC003)
- 図 4.4.8(c) 地震応答解析結果(SZ0024)
- 図 4.4.8(d) 地震応答解析結果(KGIN)

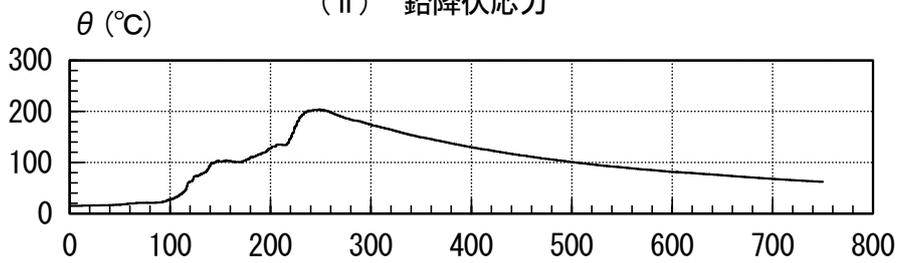
図中、(i) 免震層水平変位時刻歴、(ii) 鉛降伏応力時刻歴、(iii) 鉛プラグ平均温度時刻歴、(iv) 免震層荷重変形関係を示す。



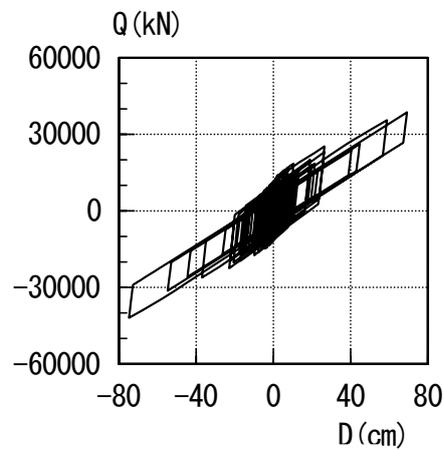
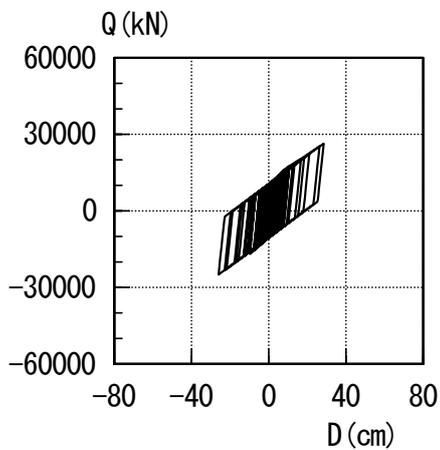
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力

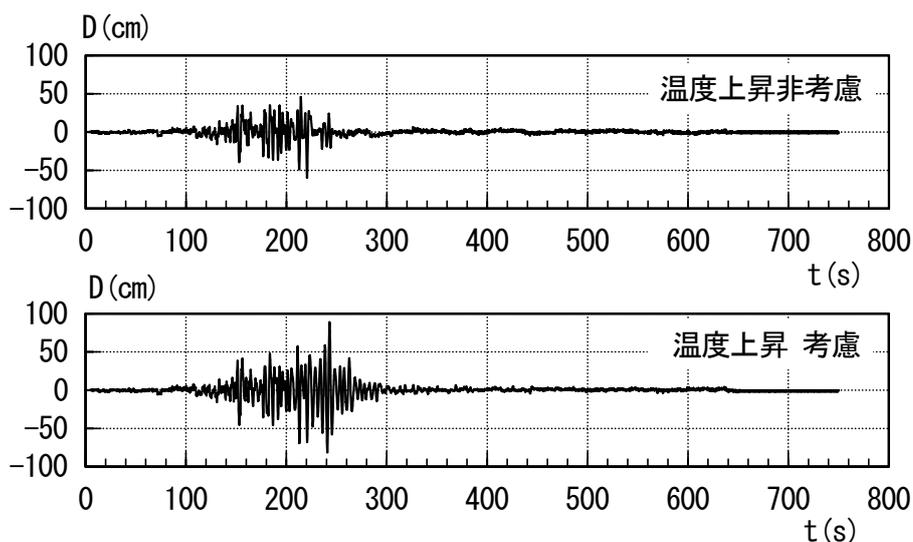


(iii) 鉛プラグ平均温度

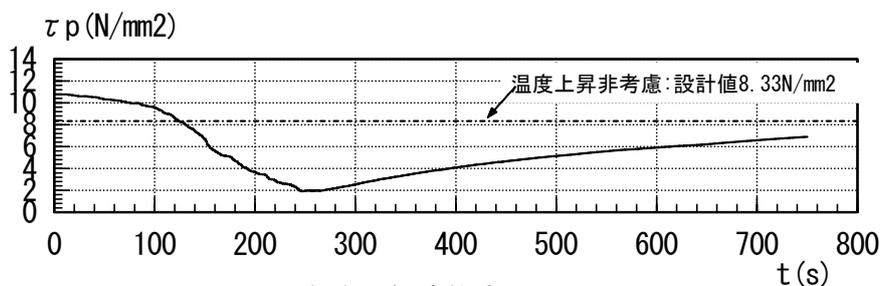


(iv) 荷重変形関係

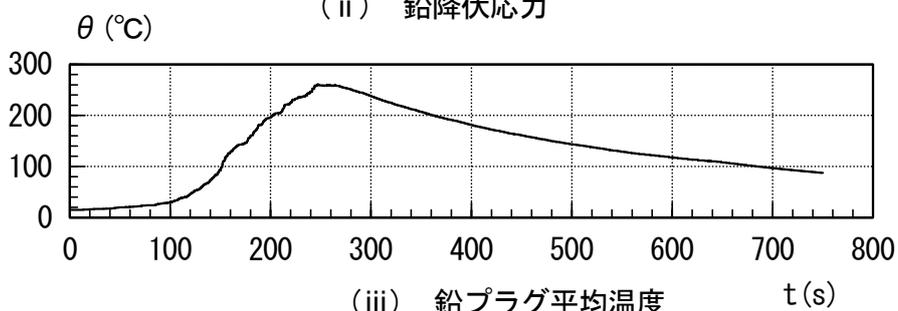
図 4.4-8(a) 地震応答解析結果(OSKH02)



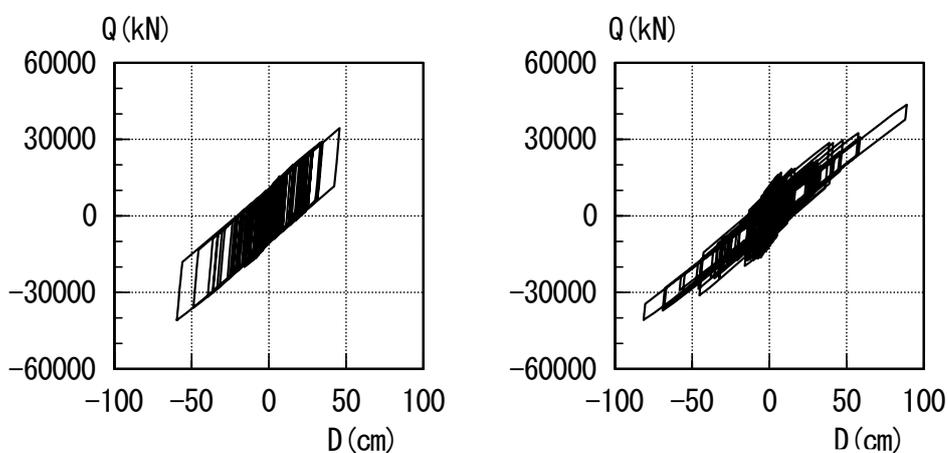
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力

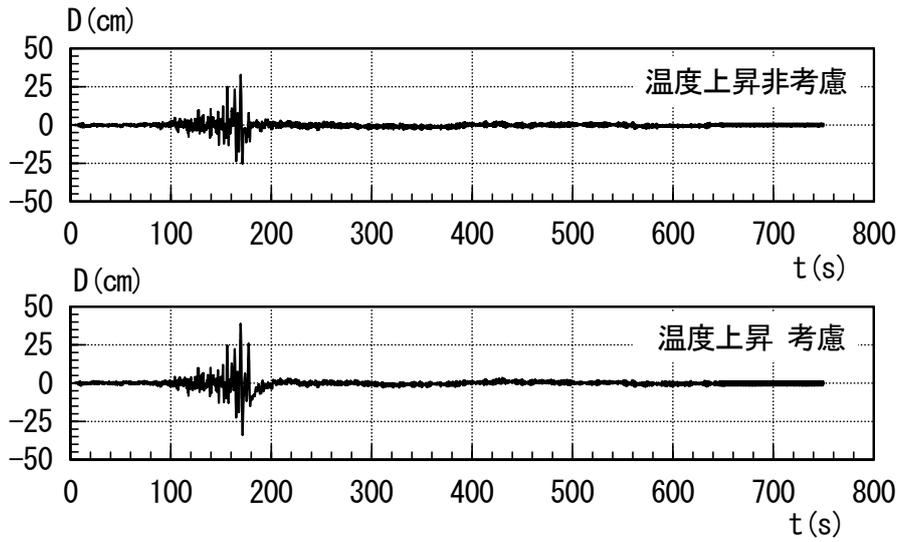


(iii) 鉛プラグ平均温度

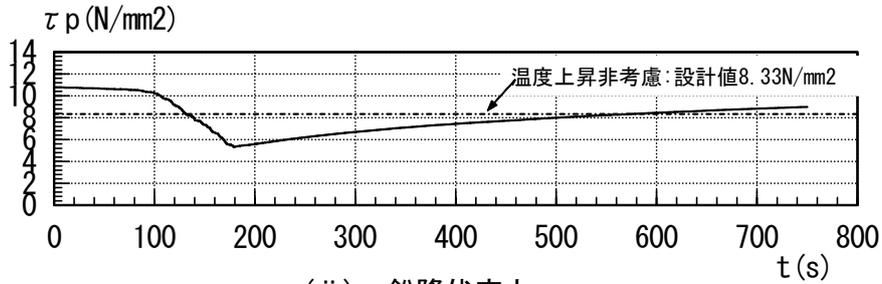


(iv) 荷重変形関係

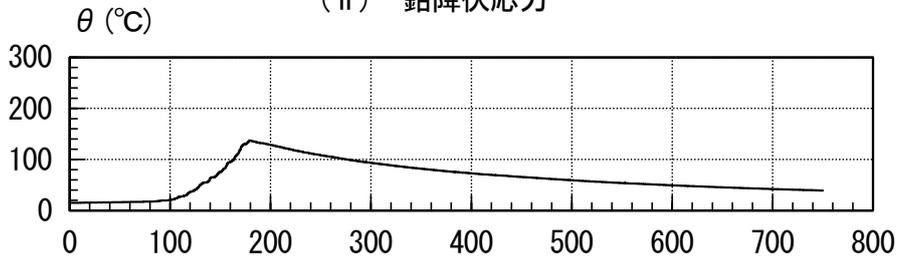
図 4. 4-8 (b) 地震応答解析結果 (AIC003)



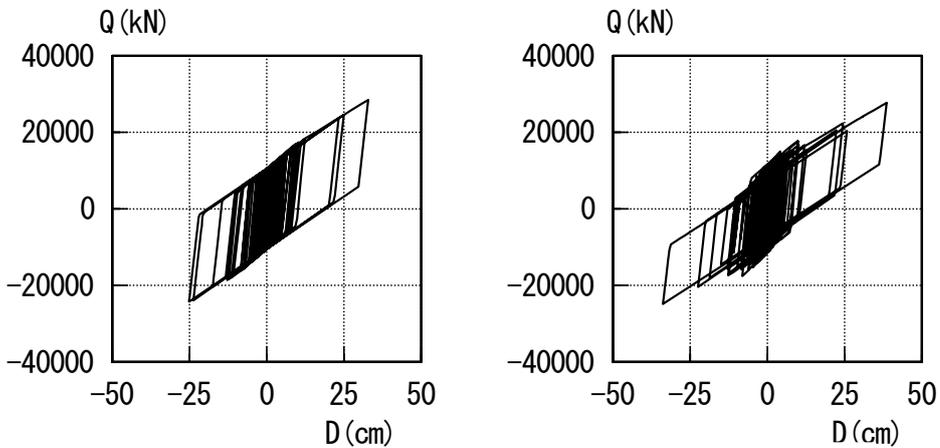
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力



(iii) 鉛プラグ平均温度

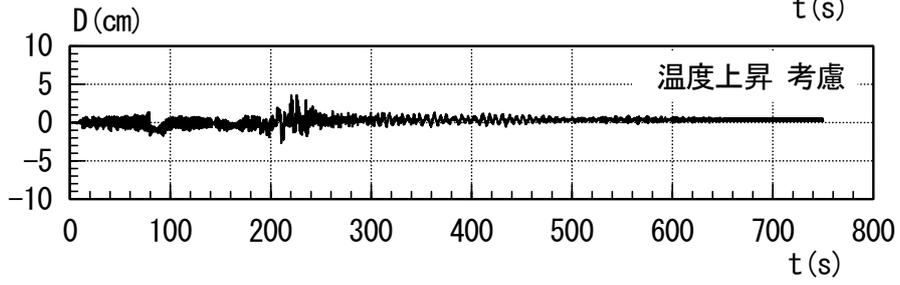
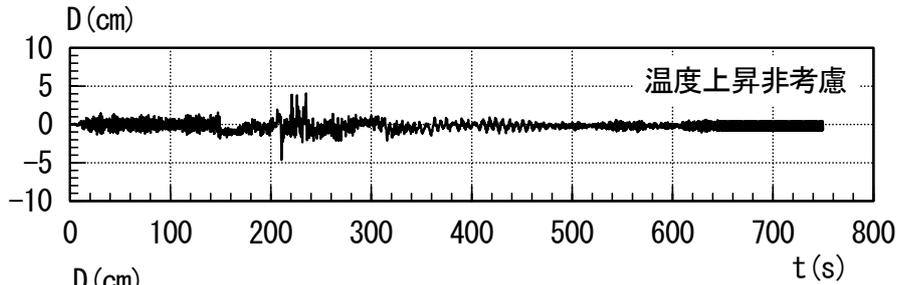


温度上昇非考慮

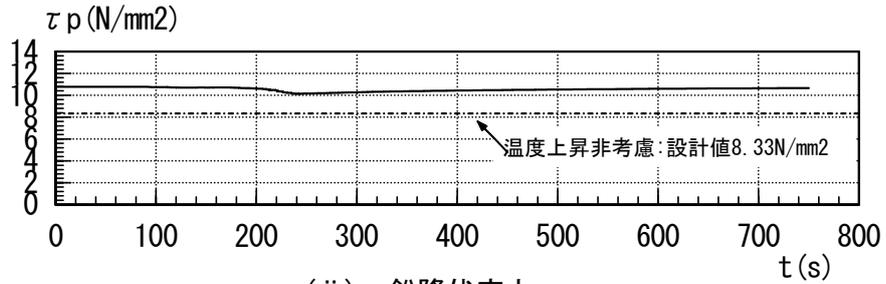
温度上昇考慮

(iv) 荷重変形関係

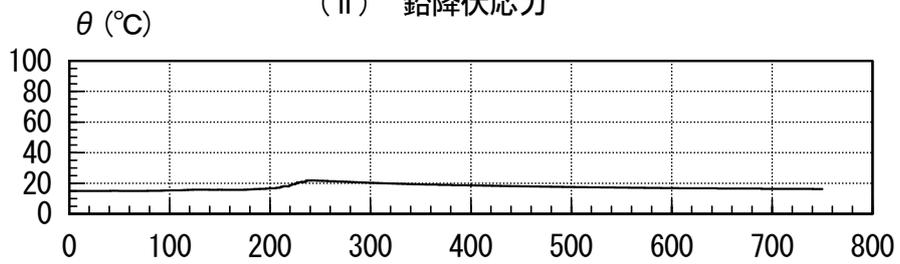
図 4.4-8(c) 地震応答解析結果(SZ0024)



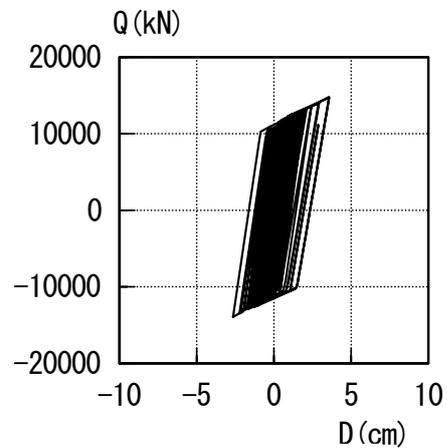
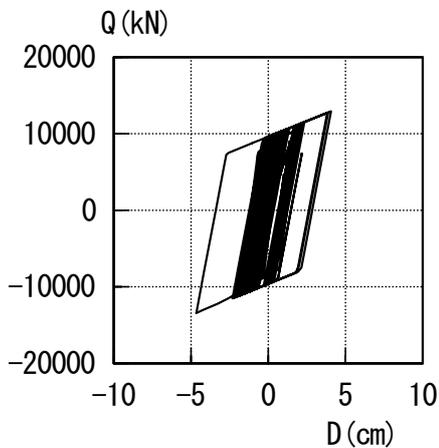
(i) 免震層水平変位



(ii) 鉛降伏応力



(iii) 鉛プラグ平均温度



温度上昇非考慮

温度上昇考慮

(iv) 荷重変形関係

図 4. 4-8(d) 地震応答解析結果(KGIN)

b) 応答予測式による検討

表 4. 4-4、図 4. 4-9 に式(4. 4-1)より得られる単位体積当たりのエネルギー吸収量( $LRB W_p/V_p$ )と LRB 降伏荷重低下率 ( $LRB k_{min}$ ) の値を示す。

表 4. 4-4 解析結果と予測式との比較 (免震層水平変位)

	$LRB W_p/V_p$ (N/mm <sup>2</sup> )	$LRB k_{min}$
OSKH02	293.6	0.493
AIC003	720.9*1	0.109*1
SZO024	237.3	0.587
KGIN	14.5	1.141

\*1 解析適用範囲外のため参考値

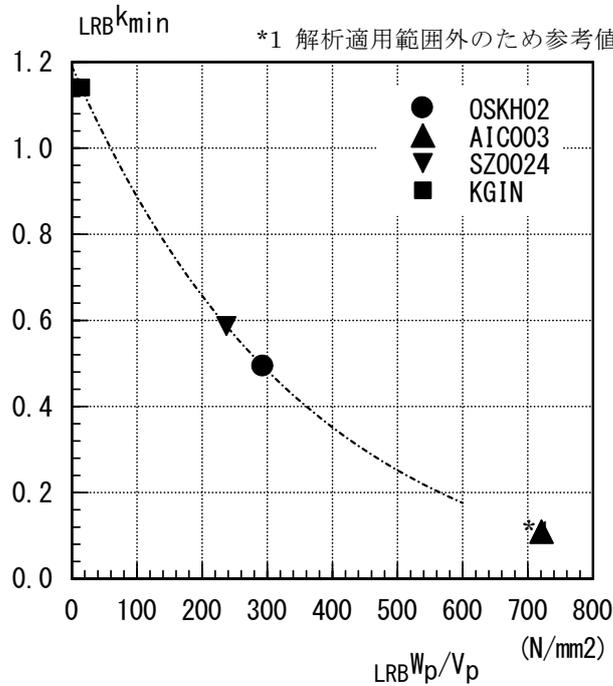


図 4. 4-9 単位体積当たりエネルギー吸収量と降伏荷重低下率

表 4. 4-5、図 4. 4-10 に温度上昇考慮時の免震層の水平変位について、地震応答解析結果と応答予測式による評価結果とを比較して示す。

応答予測式における免震層最大応答の評価においては鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇を考慮した場合の入力エネルギーと考慮しない場合の入力エネルギーを同量と仮定してエネルギーの釣り合いによる応答評価法を適用して、温度上昇を考慮した場合の免震層最大変位  $\delta'_{max}$  を温度上昇による特性変化を考慮しない時刻歴応答解析から得られた免震層最大変位  $\delta_{max}$  および降伏荷重  $Q_d$  の低下率  $LRB k_{min}$  と LRB の全履歴吸収エネルギー  $LRB W_p$ 、及び免震層積層ゴムによる剛性  $k_f$  から、次式により予測する 4.1)。

$$\delta'_{\max} = \frac{1}{k_f} \left\{ -\frac{(1+_{LRB}k_{\min})_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}} + \sqrt{\left(\frac{(1+_{LRB}k_{\min})_{LRB}W_p}{2\delta_{\max}}\right)^2 + k_f^2 \cdot \delta_{\max}^2 + 2k_f \cdot_{LRB}W_p} \right\} \quad (4.4-2)$$

表 4.4-5 解析結果と予測式との比較（免震層水平変位）

	免震層水平変位(cm)		
	地震応答 解析結果	予測式による 評価	予測式 解析結果
N-OSKH02_AV	74.8	38.1	0.51
N-OSKH02_SD	89.0*1	107.3*1	1.21*1
T-TN-AIC003_AV	38.6	41.4	1.07
T-TN-AIC003_SD	3.6	4.4	1.22

\*1 解析適用範囲外のため参考値

\*

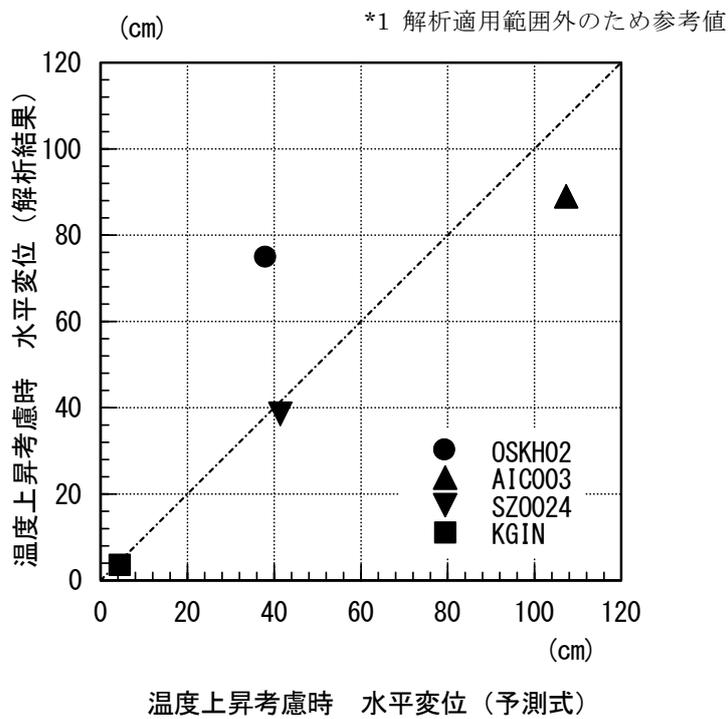


図 4.4-10 免震層水平変位比較

c) 結果のまとめ

免震装置として鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) を適用した免震建物を対象として、鉛プラグの温度上昇による降伏荷重の低下を考慮した地震応答解析を実施し、その影響評価を行った。対象とした入力地震動において、降伏荷重の低下を評価した場合には評価しない場合と比較して、免震層の水平変位が 0.77~2.63 倍程度となった。ただし愛知・津島での地震動では温度上昇を考慮した場合の鉛プラグの温度上昇が大きく、免震層の水平変位が 80cm ( $\gamma=400\%$ ) を超えているため解析対象範囲外である。水平変位の増大率が大きい大阪・此花 (OSKH2) の地震動については入力地震動の周期特性の影響が大きいと考えられる。また、降伏荷重の低下を考慮した場合の免震層水平変位の予測式による評価と地震応答解析による評価は大阪・此花 (OSKH02) の地震動を除いてほぼ一致している。

2) 高減衰積層ゴム

既往の実験によると高減衰積層ゴムも LRB と同様に長周期地震動により、破損等の損傷が生じることはないと考えられるが繰り返し加力による温度上昇に伴い、等価剛性や等価減衰定数が低下する。平成 24 年度基準整備事業 27-3 では、等価剛性の低下率や等価減衰定数の低下率は高減衰積層ゴムが吸収するエネルギー E (地震終了時) を高減衰積層ゴムの体積 V で除した E/V に基づいて低減することで、簡易的に温度上昇による影響を考慮した応答評価ができるとしている。表 4.4-6 に提案されている低減率を示す。

表 4.4-6 繰返し依存性を考慮した低減率

	$5\text{N/mm}^2 \geq E/V \geq 10\text{N/mm}^2$	$10\text{N/mm}^2 \geq E/V \geq 30\text{N/mm}^2$	$E/V \geq 30\text{N/mm}^2$
等価剛性	-5%	-10%	-
等価減衰定数	-	-5%	-5%

モデル建物 A-3 についてこの手法に基づいて検討した結果を以下に示す。

表 4.4-7 に A-3 建物の E/V の値及び低減率を示す。これに基づき解析した結果を、繰返しの影響を考慮しない場合ともに、表 4.4-8 に示す。なお、KGIN は低下の影響がないため検討を行わない。

表 4.4-7 A-3 建物の E/V および低減率

地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZ024
E/V (N/mm <sup>2</sup> )	18.9	41.0	2.2	11.0
等価剛性低減率	-10%	-15%	-	-10%
等価減衰定数低減率	-5%	-5%	-	-5%

表 4.4-8 地震応答解析結果（免震層水平変位）

入力 地震動	免震層水平変位(cm)		
	非考慮時	考慮時	考慮/非考慮
OSKH02	30.3	40.4	1.33
AIC003	60.4	解析不能	-
SZO024	37.6	40.1	1.07

繰返しによる影響を考慮した場合、OSKH02 で 1.33 倍に応答変位が大きくなり、AIC003 では積層ゴムのひずみが大きくなりモデルの適用範囲を超えたため解析できなかった。この検討は簡易的なものであり、地震終了時の吸収エネルギーにより剛性や減衰を低下させるという非常に安全側の評価であるが、高減衰積層ゴムでも繰返しによる影響はかなり大きいと考えられる。

### 3) 弾性すべり支承

弾性すべり支承には、高摩擦タイプ（摩擦係数  $\mu=0.13$  程度）、中摩擦タイプ（ $\mu=0.075$  程度）、低摩擦タイプ（ $\mu=0.015$  程度）の 3 タイプある。これまでに、それぞれのタイプの弾性すべり支承の繰返し実験が行われているが、いずれも繰返しによりすべり材の温度が上昇し、それともない摩擦係数が変動している。本検討では、モデル B-3 は低摩擦、モデル F-3 は中摩擦を使用している。

図 4.4-11 に低摩擦タイプの累積すべり変位と摩擦係数の関係を示す（嶺脇他、2011）。繰返しにより摩擦係数は低下するが、40 サイクル（累積すべり変位 24m）程度からは安定している。低下した摩擦係数は設計値の約 70%程度である。図 4.4-12 に中摩擦タイプの累積すべり変位と摩擦係数の関係を示す。累積変位が 10 m 程度まで、急激に摩擦係数が低下し約 70%程度となるが、10 m を越えると低下は著しく減少する。また、時間をおいて再度加振すると特性はほぼ、元に戻っている。

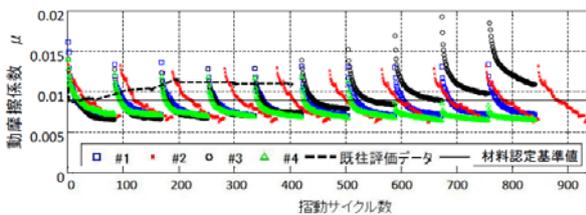


図 4.4-11 累積すべり変位と摩擦係数  
(低摩擦)

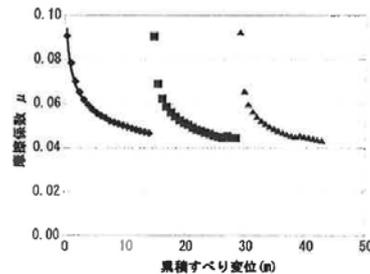


図 4.4-12 累積すべり変位と摩擦係数  
(中摩擦)

今回の解析において、累積すべり距離は低摩擦タイプの B-3 モデルで OSKH02 で 13.5m、AIC003 で 30.2m となっている。図 4.4-11 より摩擦係数の低下はややあるが、低摩擦タイプは摩擦係数が非常に小さく、すべり支承が建物の減衰性能に占める割合は非常に小さいため応答には大きな影響はないものと思われる。中摩擦タイプの F-3 モデルでは OSKH02 で 8.7m、AIC003 で 13.2m となっている。図 4.4-12 より摩擦係数は 50%程度まで小さくなっており、これを考慮すると応答変位はかなり大きくなると思われる。

### 4) 鋼材ダンパー

鋼材ダンパーは鋼材の塑性変形によりエネルギーを吸収するものであり、長時間の繰り返し荷重をうけると疲労破壊する。疲労特性については、定振幅繰り返し荷重試験をもとに疲労曲線が求められており、ダンパーの時刻歴応答変位をもとにマイナー則により疲労予測を行うことが出来る。U型ダンパーの疲労曲線を図 4. 4-13 に示す。

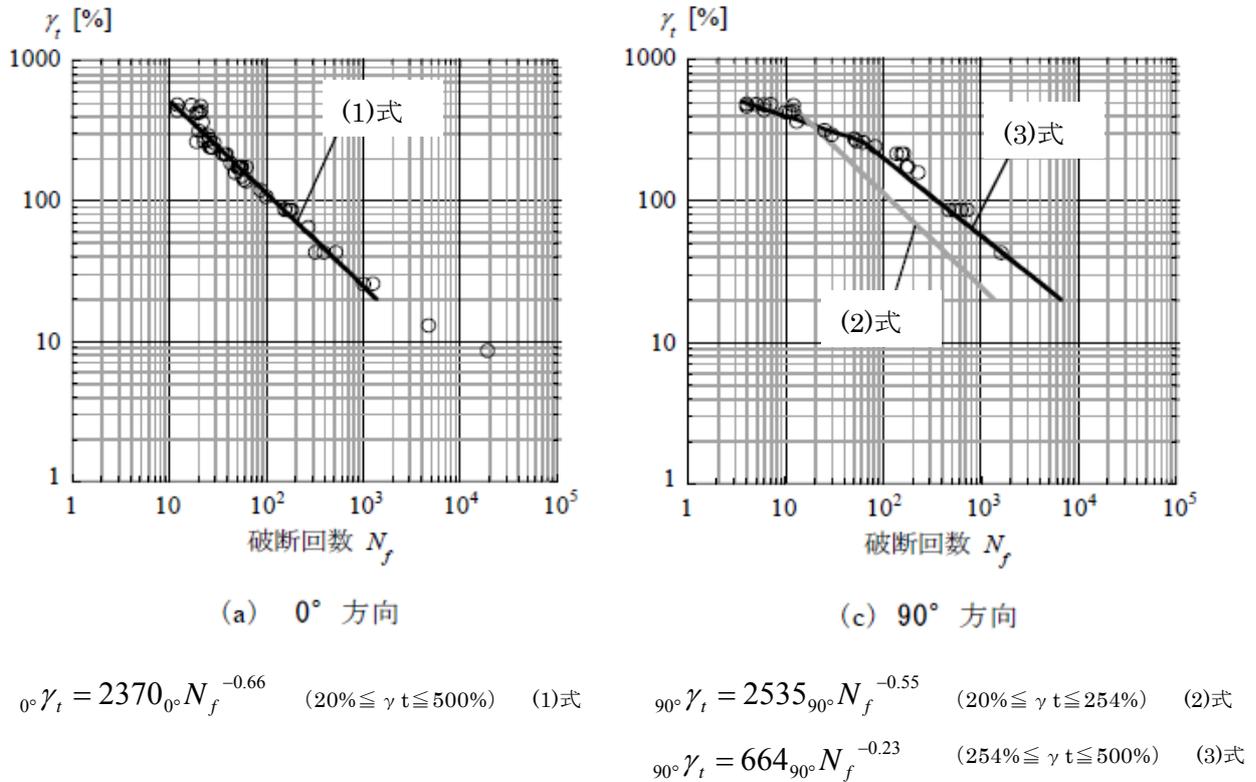


図 4. 4-13 U型ダンパーの疲労曲線(吉敷他、2012)

また、鋼棒ダンパーの疲労曲線の式を下記に示す。

接線方向  $y=49450 \cdot 1.930$  中心方向  $y=36010 \cdot 2.062$

ここにおいて、 $y$ =破断までの繰り返し回数  $x$ =方振幅(cm) である。

ダンパーの時刻歴応答変位をレインフロー法により、振幅毎のサイクル数を計数し、振幅毎の疲労損傷度  $D_i$  を下式により算定する。その後、全振幅に渡り  $D_i$  を累積しダンパーの疲労損傷度を求める。

$D_i = n_i / N_i$

$D_i$  : 振幅  $\delta_i$  における疲労損傷度

$n_i$  : 時刻歴応答変位に含まれる振幅  $\delta_i$  のサイクル数

$N_i$  : 振幅  $\delta_i$  における破断までの繰り返し回数 (疲労曲線の各式により算定)

今回の解析モデルによる検討結果に対する累積疲労損傷度の結果を表 4. 4-9 に示す。

表 4. 4-9 鋼材ダンパーの累積疲労損傷度

モデル名	H-4			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	28.4	51.4	4.7	26.6
ダンパー	UD45×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.182	0.453	0.032	0.034
モデル名	J-1			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	52.1	64.8	10.4	38.4
ダンパー	UD45×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.355	0.686	0.082	0.200
モデル名	J-1			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	52.1	64.8	10.4	38.4
ダンパー	UD50×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.277	0.534	0.155	0.064
モデル名	K-1			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	27.0	47.7	3.9	25.9
ダンパー	UD45×4			
疲労曲線	0 度方向			
D 値	0.170	0.470	0.025	0.143
モデル名	E-4			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	21.9	37.9	2.8	18.5
ダンパー	70φR285(L)			
疲労曲線	中心方向			
D 値	0.052	0.327	0.003	0.055

鋼材ダンパーの累積疲労損傷度は OSKH02 で最大 0.355、AIC003 で最大 0.686 とかなり大きい  
が 1.0 以下となっており破断には至っていない。

鋼材ダンパーも繰返し変形を受けるとやや降伏耐力は低下するが、その程度は小さく、特に  
考慮する必要はないと思われる。

5) 鉛ダンパー

鉛ダンパーは鉛の塑性変形によりエネルギーを吸収するものであり、長時間の繰り返し載荷をうけると破断する。破断と繰り返し回数の関係については、定振幅繰り返し載荷試験をもとに式が求められており、ダンパーの時刻歴応答変位をもとにマイナー則により疲労予測を行うことができる。

図 4.4-14 に鉛ダンパーの振幅と破断時繰り返し回数の関係を示す。鉛ダンパーには U180 タイプと U2426 タイプがあるが、ダンパー種類にかかわらず破断時繰り返し回数は図中の式で表現できる。

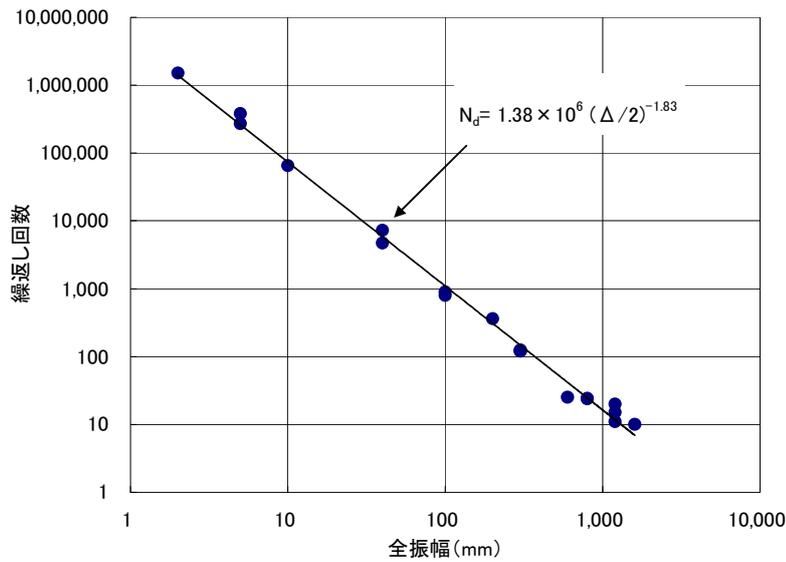


図 4.4-14 鉛ダンパーの疲労曲線

鋼材ダンパーと同様の方法で今回の解析モデルによる検討結果に対する、鉛ダンパーの累積疲労損傷度の結果を表 4.4-10 に示す。

表 4.4-10 鋼材ダンパーの累積疲労損傷度

モデル名	E-2			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	21.9	37.9	2.8	18.5
ダンパー	U180			
D 値	0.061	0.294	0.006	0.065
モデル名	H-4			
地震動	OSKH02	AIC003	KGIN	SZO024
免震層の最大変位(cm)	28.4	43.7	4.7	25.6
ダンパー	U2426			
D 値	0.119	0.365	0.011	0.076

鉛ダンパーの累積疲労損傷度は OSKH02 で最大 0.119、AIC003 で最大 0.365 とやや大きい  
が 1.0 以下となっており破断には至っていない。

鉛ダンパーは繰返し変形を受けると発熱の影響で降伏耐力が低下する。図 4.4-15 に実験に鉛  
ダンパーの累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率を示す(西村他、2012)。

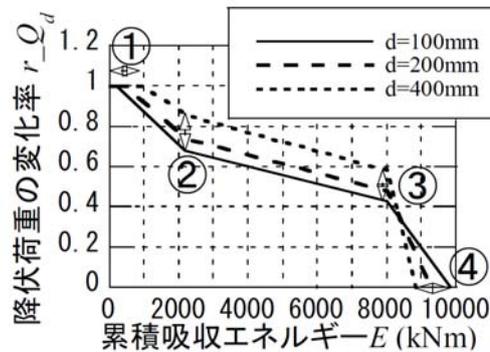


図 4.4-15 鉛ダンパーの累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率

今回の解析モデルによる検討では、鉛ダンパーの 1 台あたりの吸収エネルギーは AIC003 で最  
大 5,261kNm、OSKH02 で最大 2,341 kNm であり、降伏耐力は 50%程度低下すると思われ、最大  
応答変位はかなり増大すると考えられる。

#### 6) オイルダンパー

オイルダンパーは、温度上昇や繰返し回数によって、エネルギー吸収性能は変化しないこと  
は知られている。しかし、単位時間当たりの入力熱量がオイルダンパーの熱容量を超え、外壁  
温度が上昇していくと作動油の滲み出しが生じるという知見がある。

設計限界温度は、タンク室の油量は余裕があるので直ちに減衰低下は生じないので、現状は  
余裕を見て外壁温度 80℃を許容値としている。また、パッキンについては熱劣化試験を行い温  
度と寿命の関係データから安全を確認している。

オイルダンパーの温度上昇については、地震動は瞬間的であり、放熱量が小さいため、入力  
エネルギーのほとんどが温度上昇に反映されると考えると、下式により推定することができる。

$$T_m = \frac{Q_m}{V_s \rho_s C_s + V_o \rho_o C_o} + t_a \dots \dots \dots (4.4-3)$$

ここで、 $Q_m$  : オイルダンパへの総入力熱量、 $T_m$  : 表面温度

$V_s$  : 鉄鋼部品の体積、 $V_o$  : オイル体積、 $\rho_s$  : 鉄鋼部品の密度、

$C_s$  : 鉄鋼部品の比熱比、 $\rho_o$  : オイル密度、 $C_o$  : オイルの比熱比

今回のモデル建物のうち B-3 棟と J-1 棟についてオイルダンパーの温度を式 4.4-3 により  
算定した結果を表 4.4-11 に示す。これによると、オイルダンパーの最大温度は 69.2℃であり  
80℃以下となっている。

表 4. 4-10 オイルダンパーの温度上昇

モデル	B-3		J-1	
ダンパー種類	限界荷重 1000kN		限界荷重 2000kN	
	吸収エネルギー (kNm/台)	T (°C)	吸収エネルギー (kNm/台)	T (°C)
OSKH02	1,637	23.2	41,712	39.3
AIC003	6,328	31.7	75,292	69.2

#### 参考文献

T.Honma, A.Kondo, Y.Takenaka, H.Kitamura : Seismic Response Prediction Method Considering Heat-Mechanics Interaction Behavior of Lead Rubber Bearing、Fifth World Conference on Structural Control and Monitoring(5WCSCM), Tokyo, 12-14 July 2010.

竹中康雄他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その9 熱伝導解析による実験結果のシミュレーション、その10 鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案、その11 LRBの温度上昇を考慮した地震応答解析）、AIJ大会（中国）、2008.9.

嶺脇重雄他：長周期地震動に対する免震部材の多数回繰返し実験（その5 弾性すべり支承（低摩擦））、日本建築学会大会梗概集、2011.8

吉敷祥一他：水平2方向載荷下における繰返し変形性能に関する実験－免震構造用U字型鋼材ダンパーの水平2方向特性 その1－、巻、第680号、pp.1579-1588、2012.10

西村拓也他：長周期地震動に対する免震部材のモデル化と免震建築物の応答評価 その5：鉛ダンパーのモデル化と地震応答解析、日本建築学会大会梗概集、2012.9

#### 4-5 地震動のばらつきに関する検討

本検討に用いている地震動の作成方法では、作成時に用いた乱数の値によって異なった波が無数に作成される。連動地震の場合には、複数の波を足し合わせるため、地震動のばらつきは大きくなると思われる、2011年度の地震動の作成にあたっては、乱数を変えた21波を作成し、5%減衰の擬似応答スペクトルの平均値に対し周期1~10秒の残差の和が最少、かつエネルギースペクトルの平均に対する残差の和が正で残差の絶対値が最小の1波を選定したが、2011年度の報告書に記載しているように、選定した地震動による応答値は21波の応答値の平均ではなく、平均をかなり下回るものが多かった。

2012年度は、地震動の作成において、擬似速度応答スペクトルの対数平均値と21波の速度波形のうち最大速度が中央値の位相スペクトルを用いて再作成した地震動(三の丸波作成手法)を用いている。

本章では、1質点系のモデルを用いて免震周期  $T_f$  や降伏せん断力係数  $\alpha_s$  を変えたパラメトリックスタディを行い、乱数の影響により応答値がどの程度ばらつくか、今回の検討に用いた地震動が、21波の平均的な応答値か否かを検討した。

解析には図4.5-1に示すように1質点系モデルを用いた。

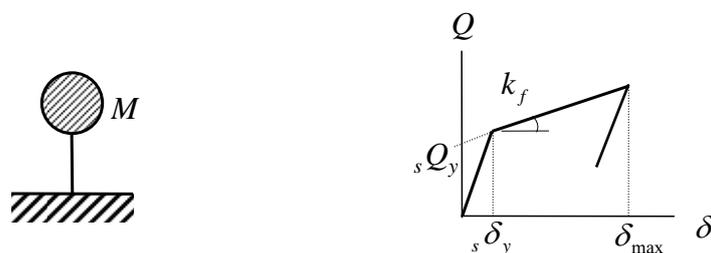


図 4.5-1 解析モデル

免震層はノーマルバイリニア型で降伏変位  $\delta_y$  は1cmで固定している。降伏後剛性  $K_f$  は、免震周期から逆算した。免震周期は約1秒から10秒まで変化させた。降伏せん断力(切片荷重)  $sQ_y$  は、ダンパーの降伏せん断力係数  $\alpha_s$  が0.02、0.03、0.04となるように設定した。

入力地震動はモデル建物の解析に用いた津島(AIC003)・新宿(KGIN)・此花(OSKH02)・浜松(SZ0024)の4地点において、地震動の乱数を変えて作成された21波と、その最大速度が中央値の地震動の位相を用いて再作成された地震動1波の各22波を用いた。

図4.5-2~図4.5-4に最大応答変位と免震周期の関係を、ダンパーの降伏せん断力係数( $\alpha_s$ )ごとに示す。黒線が位相の異なる21波の応答結果を示し、赤線が平均波による応答を示している。津島では、免震周期2~3秒で最大応答を示し、それ以降の免震周期ではほぼ一様の最大応答と示している。 $\alpha_s$ が大きくなると最大応答は若干減少するものの、最大応答変位は40~70cm程度の応答を示している。新宿では、 $\alpha_s$ が0.02と小さい場合では、免震周期7秒以上で非常に大きな変位応答になるケースもあるものの、 $\alpha_s$ が大きくなると急激に変位応答は小さくなっている。此花では、免震周期2秒と6秒前後にピークをもつ応答特性を示す。特に免震周期6秒

前後では非常に大きな応答変位となるケースもあるものの、応答のばらつきも大きい。ただ免震周期4秒付近では応答変位が小さくなっている。平均波（赤線）による応答変位は、 $\alpha_s$ が0.03以上であればすべての免震周期で50cm以下となっている。浜松では、免震周期3秒前後にピークを示し、それ以降の免震周期での応答は周期の影響はあまり受けていない。免震周期が4秒以上であれば、最大応答変位は60cm以下となっている。また、今回選定した地震動は概ね21波の平均的な応答となっている。

図4.5-5～図4.5-7 にエネルギーの等価速度（ $EV$ ）と免震周期の関係を、ダンパーの降伏せん断力係数（ $\alpha_s$ ）ごとに示す。津島では、 $EV$ の変動は小さく、免震周期3秒以上では400～500cm/s程度となっている。同じく、浜松でも $EV$ の変動は小さく200～300cm/s程度となっている。新宿では、 $EV$ は $\alpha_s$ が大きくなるにしたがい減少している。此花では、免震周期2秒と6秒付近にピークが見られるものの、平均波による $EV$ は比較的安定しており、250～300cm/s程度となっている。

図4.5-8～図4.5-10 に等価繰り返し回数（ $eqn$ ）と免震周期の関係を、ダンパーの降伏せん断力係数（ $\alpha_s$ ）ごとに示す。等価繰り返し回数は、次式により算出した。

$$n_{eq} = \frac{\eta}{4\mu_m}$$

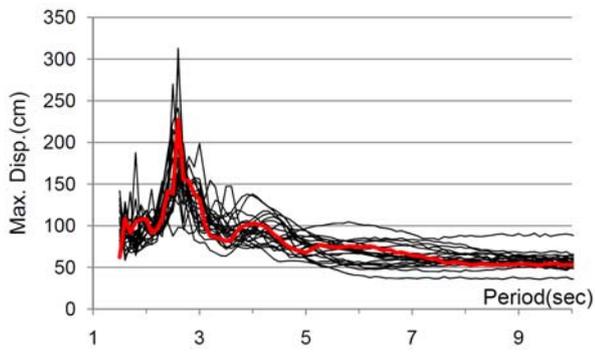
ここで、 $\eta$ ：累積塑性変形倍率 $\left( = \frac{\delta_p}{\delta_y} \right)$ ， $\mu_m$ ：塑性変形倍率 $\left( = \frac{\delta_{max}}{\delta_y} - 1 \right)$ ，  
 $\delta_p$ ：累積塑性変形， $\delta_{max}$ ：最大変形， $\delta_y$ ：降伏変形

津島では、免震周期3秒以上であれば $\alpha_s$ にかかわらず、 $eqn$ はほぼ10～15の範囲にある。同様に、浜松でも免震周期3秒以上であれば、 $eqn$ は5～10程度となっている。浜松は多少ばらつきが大きいものの、 $eqn$ は5～10程度といえる。ただし、 $\alpha_s$ が0.02の場合は免震周期が5秒以下では大きくなる。新宿での $eqn$ はもっとも小さく6以下である。

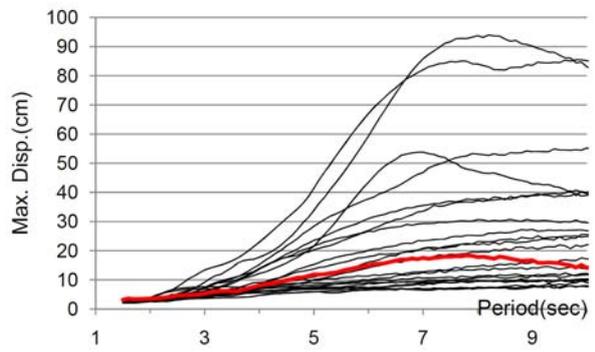
表4.5.1 に免震周期4秒での応答値のばらつきを示す。津島と浜松の応答変位の最小値と最大値は、2倍程度の差が見られる。此花では最小と最大の差は3倍程度となっている。エネルギー入力の等価速度は、津島と浜松では比較的安定した値を示しているものの、他の地震動では多少ばらつきが大きい。等価繰り返し数はダンパーの降伏せん断力係数の影響をそれほど受けず安定しており、津島が最も大きな値を示し、此花と浜松がそれに続いている。

表 4.5-1 免震周期 4 秒での応答値のばらつき

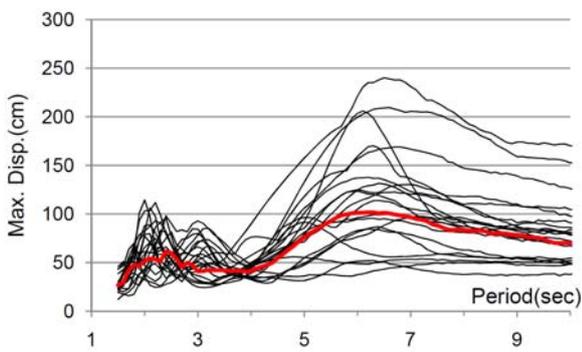
応答値	$\alpha_s$	津島	新宿	此花	浜松
最大変位 (cm)	0.02	73～138	5～23	33～90	27～58
	0.03	49～97	2～13	22～78	23～52
	0.04	39～69	2～4	16～62	20～42
エネルギー入力 の等価速度 (cm/s)	0.02	381～460	60～108	235～302	215～253
	0.03	388～485	33～77	222～304	230～263
	0.04	404～488	37～56	207～292	242～276
等価繰り返し数	0.02	10～16	3～8	7～13	6～12
	0.03	9～17	2～5	5～14	5～11
	0.04	10～19	2～6	5～11	5～11



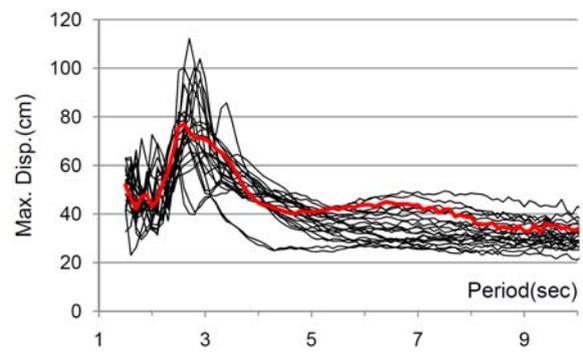
(a) 津島 (AIC003)



(b) 新宿 (KGIN)

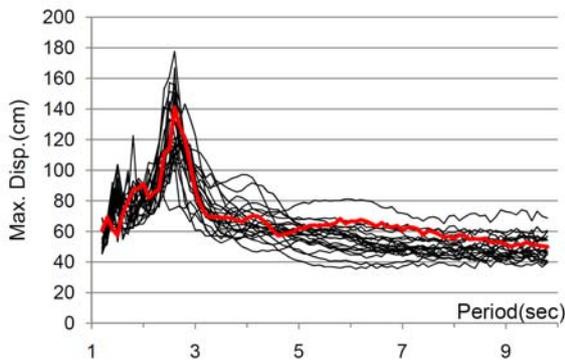


(c) 此花 (OSKH02)

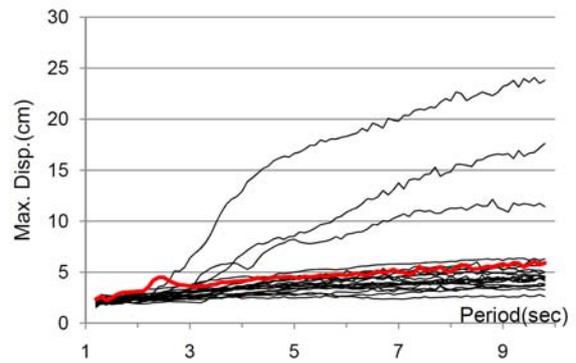


(d) 浜松 (SZO024)

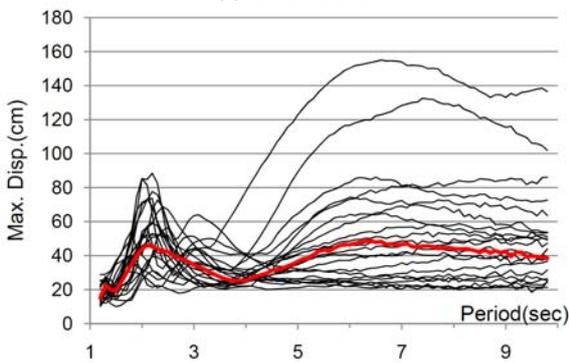
図 4.5-2 最大応変位 ( $\alpha_s = 0.02$ )



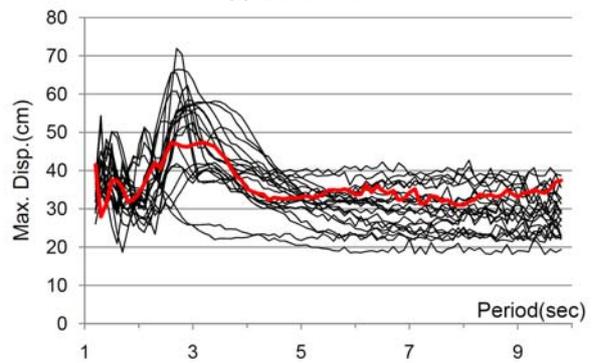
(a) 津島 (AIC003)



(b) 新宿 (KGIN)



(c) 此花 (OSKH02)



(d) 浜松 (SZO024)

図 4.5-3 最大応変位 ( $\alpha_s = 0.03$ )

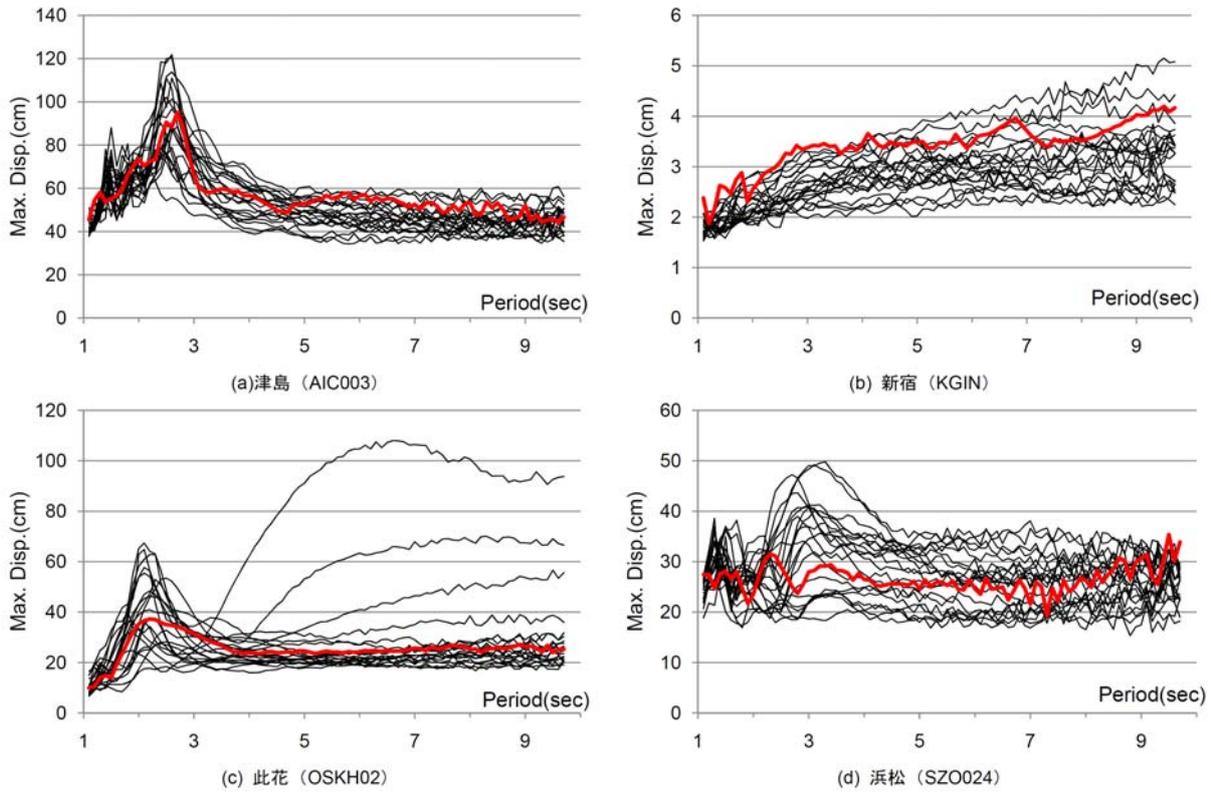


図 4.5-4 最大応変位 ( $\alpha_s = 0.04$ )

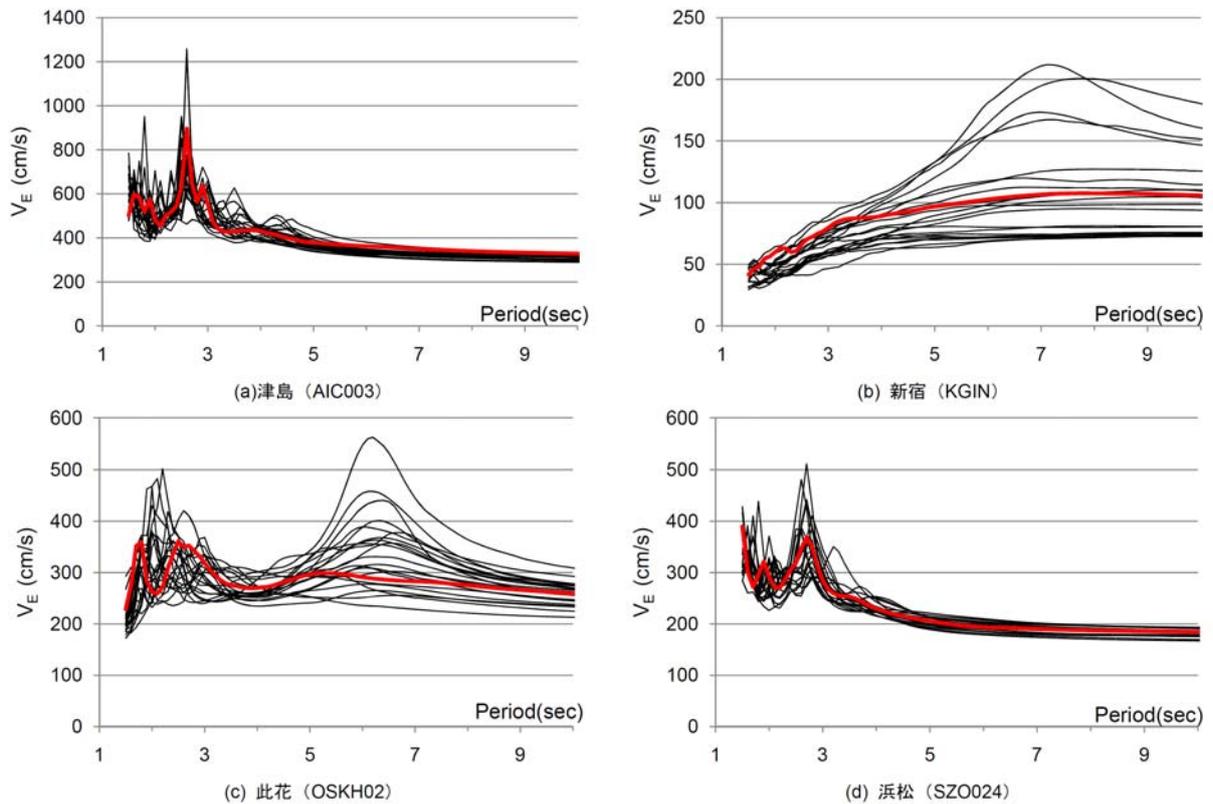


図 4.5-5 エネルギー入力の等価速度 ( $\alpha_s=0.02$ )

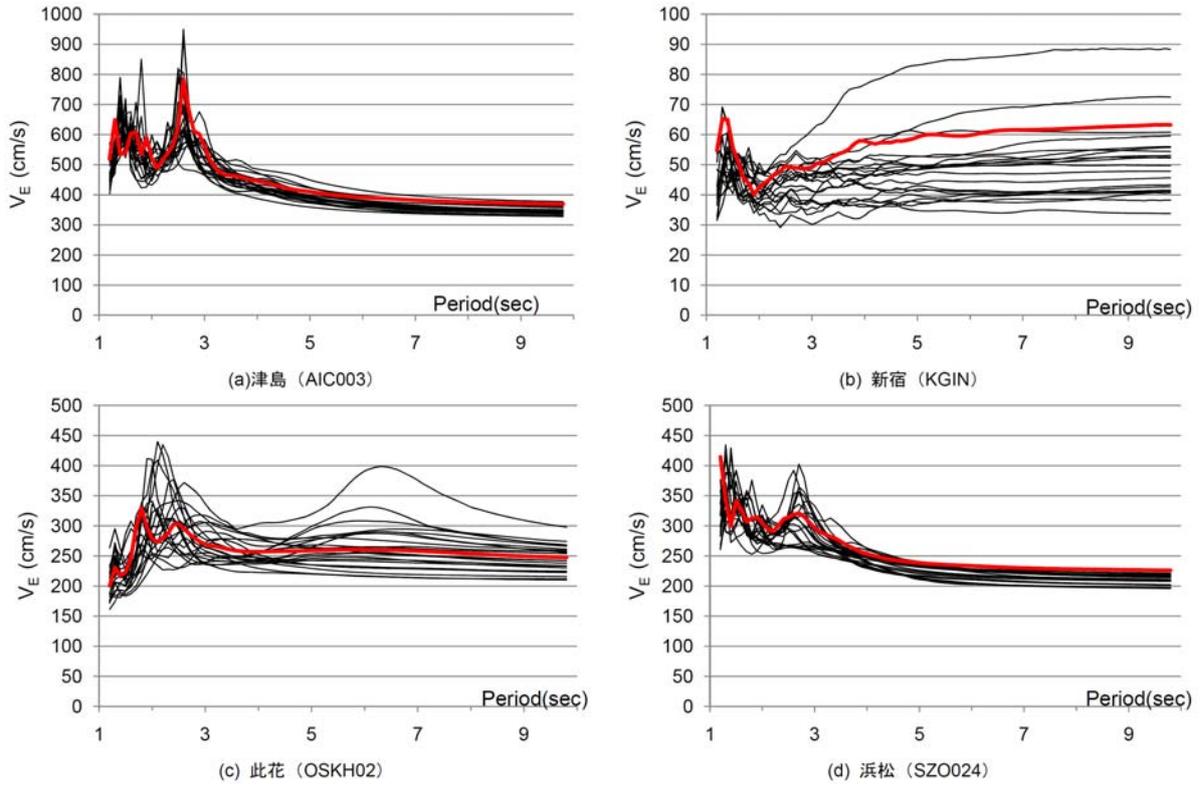


図 4.5-6 エネルギー入力の等価速度 ( $\alpha_s=0.03$ )

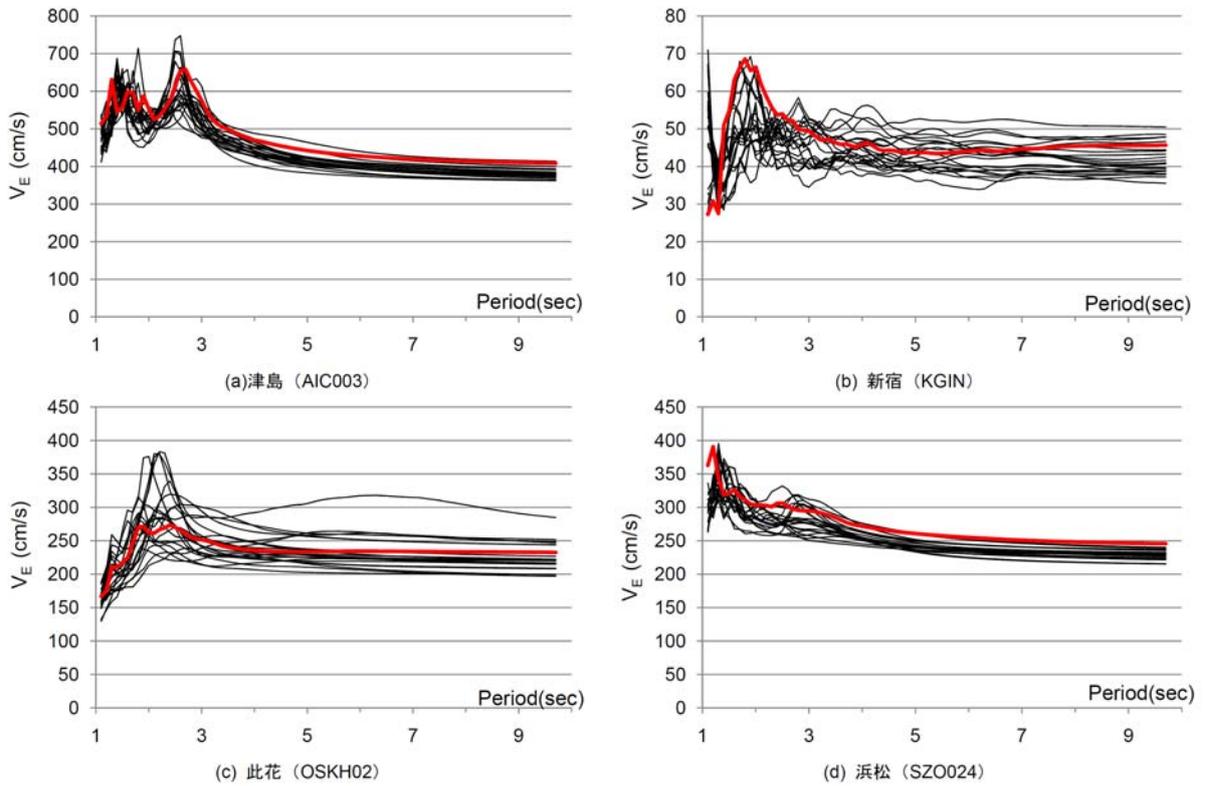


図 4.5-7 エネルギー入力の等価速度 ( $\alpha s=0.04$ )

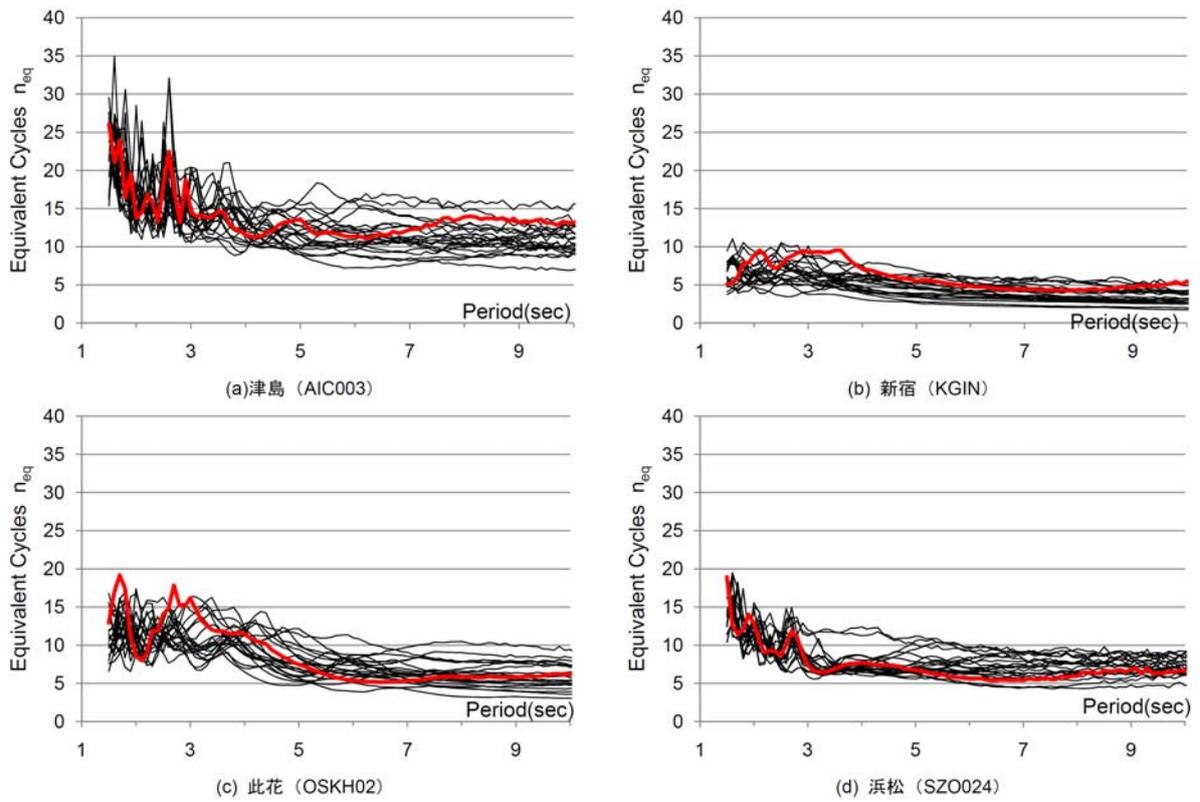


図 4.5-8 等価繰返し回数 ( $\alpha s=0.02$ )

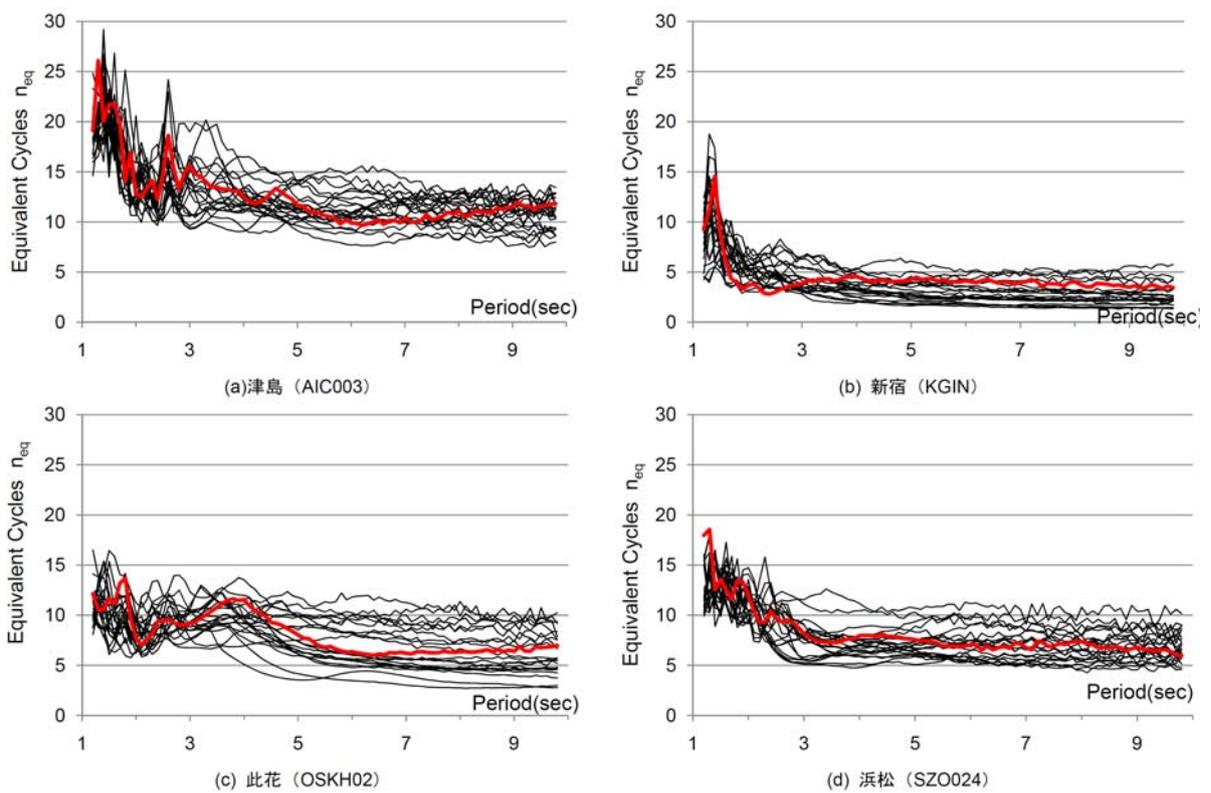


図 4.5-9 等価繰返し回数 ( $\alpha_s=0.03$ )

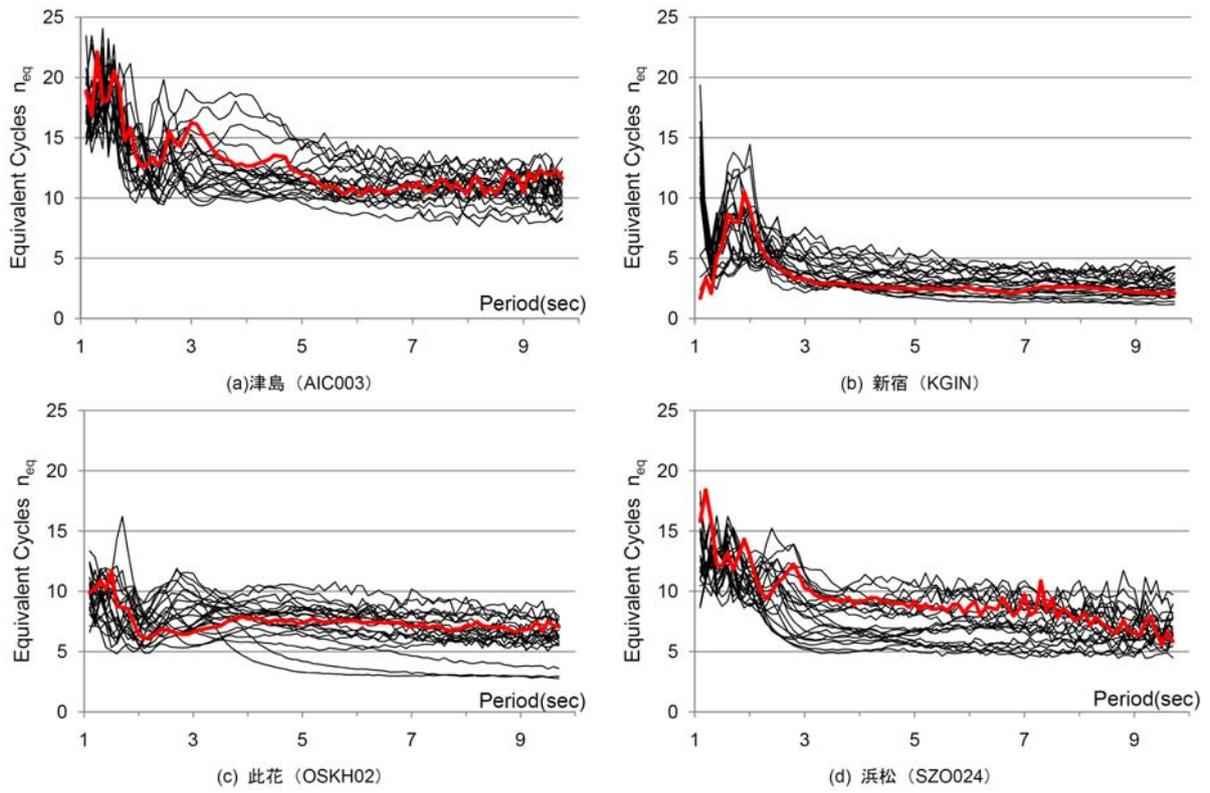


図 4.5-10 等価繰返し回数 ( $\alpha_s=0.04$ )

#### 4-6 まとめ

- 2012年度の検討波は平均波であるが、津島(AIC003)を除き、2011年度に検討を行った3連動地震の地震動に比べ大きく、概ね2011年度の平均+標準偏差波と同程度になっている。津島(AIC003)は2011年度の平均+標準偏差波よりも大きく、1.5~2倍程度になっている。これは、4連動地震になり断層の大きさが大きくなったことに加え、断層までの最短距離が近くなった影響が大きい。
- 津島(AIC003)の地震動による応答値は非常に大きく、約半数のモデル建物の応答変位が限界変位を超えている。この検討では、繰返しによる降伏耐力の低下などの品質変動は考慮していないため、それを考慮すると応答変位はかなり大きくなり、限界変位を超えるものがもっと多くなると思われる。
- 此花(OSKH02)でも、応答変位が限界変位を超えているものが2棟、設計許容変位を超えているものが4棟あり、繰返しによる品質変動を考慮すると応答変位はかなり大きくなり、限界変位を超えるものがもっと多くなると思われる。
- 新宿(KGIN)は、応答変位がすべて設計許容変位以下となっており、問題はなさそうである。浜松(SZ0024)は、応答変位が限界変位を超えているものはないが、設計許容変位を超えているものが4棟ある。
- 2012年度の地震動は非常に大きく、津島や此花では通常のレベル2のクライテリア以下とするのには、減衰量をかなり大きくしないと困難であると思われる。特に津島は非常に地震動のレベルが大きいため、減衰量を大きくすれば限界変位以下とすることは可能かもしれないが、レベル2のクライテリア以下にすることは困難であると思われる。
- LRBの場合は、繰返しにより降伏耐力が大きく低下するため、入力エネルギーが大きい場合には、この品質変動を考慮すれば応答値はかなり大きくなる可能性がある。高減衰積層ゴムは、繰返しによる品質変動は小さいが、それを考慮すると応答変位がやや大きくなる場合がある。
- 鋼材ダンパーや鉛ダンパーの累積疲労損傷は、今回の地震動では最もエネルギーの大きい津島の地震動でも、限界値以下であった。オイルダンパーの温度は、今回の地震動ではエネルギーの大きい津島の地震動でも、80℃以下であった。
- 今回の地震動は、乱数を変えて作成された21波のうち、擬似速度応答スペクトルの対数平均値と21波の速度波形のうち最大速度が中央値の位相スペクトルを用いて再作成した地震動（三の丸波作成手法）を用いているが、免震周期や降伏せん断力係数を変えたパラメトリックスタディを行ったところ、その応答変位は概ね21波の平均的な値となっていた。