

付録1 各免震部材のばらつき幅の整理

1. 各免震部材単体の特性変動について

ここでは、免震部材の特性変動の要因として、

- a) 製造のばらつき
- b) 経年劣化
- c) 環境温度変化

から成るものとし、各要因の変化率を足し合わせるにより特性変動を評価する。

ただし、上記の a)~c)以外の要因についても、それぞれの免震部材について言及する。

各製作会社にて部材認定を取得している製品の中から数品を抽出し (A,B,C・・・)、表形式にて整理する。変動ばらつき幅の出典は、製造会社発行の技術資料^{1),2)}及び日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-³⁾である。文献 3)は発刊後 5 年が経過しており、現状の特性変動の基準値は、製造実績等の反映から文献 3)の値から変化している可能性がある。よってここで示す変動幅は、特性変動値の目安としての参考資料とみなす。各表中の右端に抽出した製品においての変化率の平均と最大または最小の変化率を示す。

(1) 天然ゴム系積層ゴム

調査対象は、製作会社 5 社の各製品である。変動ばらつき幅の出典は、製造会社の技術資料及び日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-である。水平剛性の変化率は、+側：0.3 以下、-側：-0.2 以上となっている。この値は、告示第 6 の計算方法における γ (層せん断力の割増係数) の最低値 1.3 および変形増大率 α の最低値 1.2 ($=1/(1-0.2)=1.25$) と対応する。

表 付 1-1 天然ゴム系積層ゴムの水平剛性に対する変動要因とばらつき幅
(a)+側

要因	特性	A	B	C	D	E	平均	最大
1 製造ばらつき	水平剛性	0.10	0.10	0.10	0.15	0.10	0.11	0.15
2 経年劣化	水平剛性	0.10	0.10	0.07	0.10	0.15	0.10	0.15
3 環境温度変化	水平剛性	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06
合計	水平剛性	0.26	0.26	0.21	0.30	0.30	0.27	0.30

(b)-側

要因	特性	A	B	C	D	E	平均	最小
1 製造ばらつき	水平剛性	-0.10	-0.10	-0.10	-0.15	-0.10	-0.11	-0.15
2 経年劣化	水平剛性	0	0	0	0	0	0	0
3 環境温度変化	水平剛性	-0.05	-0.06	-0.02	-0.05	-0.08	-0.05	-0.08
合計	水平剛性	-0.15	-0.16	-0.12	-0.20	-0.18	-0.16	-0.20

表 付 1-2 天然ゴム系積層ゴムの水平剛性に対する歪み依存性とばらつき幅

要因	特性	A	B	C	D	E	平均	最小
4 歪み依存性	50%/100%	0.12	0.10	0.10	0.15	0.10	0.11	0.15
	200%/100%	-0.12	-0.10	-0.07	-0.10	-0.10	-0.10	-0.12

(2) 鉛プラグ入り積層ゴム

調査対象は、製作会社4社の各製品である。変動ばらつき幅の出典は、日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-である。鉛プラグ入り積層ゴムの2次剛性の変化率は、表付1-3より+側：0.31、-側：-0.15である。

切片荷重の変化率は、表付1-5より+側：0.40、-側：-0.27である。

表付1-3 鉛プラグ入り積層ゴムの2次剛性に対する変動要因とばらつき幅
+側

要因	特性	A	B	C	D	平均	最大
1	製造ばらつき	2次剛性	0.10	0.10		0.15	0.15
2	経年劣化	2次剛性	0.10	0.10		0.10	0.10
3	環境温度変化	2次剛性	0.06	0.06		0.06	0.06
合計		2次剛性	0.26	0.26		0.31	0.31

-側

要因	特性	A	B	C	D	平均	最小
1	製造ばらつき	2次剛性	-0.10	-0.10		-0.15	-0.10
2	経年劣化	2次剛性	0.00	0.00		0.00	0.00
3	環境温度変化	2次剛性	-0.05	-0.06		-0.15	-0.05
合計		2次剛性	-0.15	-0.16		-0.30	-0.15

表付1-4 鉛プラグ入り積層ゴムの等価剛性に対する変動要因とばらつき幅

(a)+側

要因	特性	A	B	C	D	平均	最大
1	製造ばらつき	等価剛性	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
2	経年劣化	等価剛性	0.06	0.10	0.15	0.10	0.15
3	環境温度変化	等価剛性	0.14	0.15	0.07	0.12	0.15
合計		等価剛性	0.30	0.35	0.32	0.32	0.35

(b)-側

要因	特性	A	B	C	D	平均	最小
1	製造ばらつき	等価剛性	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
2	経年劣化	等価剛性	0.00	0	0.00	0.00	0.00
3	環境温度変化	等価剛性	-0.12	-0.15	-0.10	-0.12	-0.10
合計		等価剛性	-0.22	-0.25	-0.20	-0.22	-0.20

表 付 1-5 鉛プラグ入り積層ゴムの切片荷重に対する変動要因とばらつき幅

(a) 十側

要因		特性	A	B	C	D	平均	最大
1	製造ばらつき	切片荷重	0.10	0.10		0.15	0.12	0.15
2	経年劣化	切片荷重	0.00	0.05		0.05	0.03	0.05
3	環境温度変化	切片荷重	0.23	0.20		0.20	0.21	0.23
合計		切片荷重	0.33	0.35		0.40	0.36	0.40

(b) 一側

要因		特性	A	B	C	D	平均	最小
1	製造ばらつき	切片荷重	-0.10	-0.10		-0.15	-0.12	-0.10
2	経年劣化	切片荷重	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00
3	環境温度変化	切片荷重	-0.21	-0.17		-0.15	-0.18	-0.15
合計		切片荷重	-0.31	-0.27		-0.30	-0.29	-0.27

LRB の 2 次剛性と降伏荷重の歪み依存性を図付 1-1 及び図付 1-2 に示す。図 付 1-1 より降伏後剛性はせん断ひずみの低下とともに低減する。また降伏荷重は、せん断ひずみが 50%を超えると基準値と同等であると評価している。

$$CKd = \begin{cases} 0.779 \gamma^{-0.43} & [\gamma < 0.25] \\ \gamma^{-0.25} & [0.25 \leq \gamma < 1.0] \\ \gamma^{-0.12} & [1.0 \leq \gamma \leq 2.5] \end{cases} \quad \gamma: \text{ひずみ}(=\delta/H) \quad CQd = \begin{cases} 2.036 \cdot \gamma^{0.41} & [\gamma \leq 0.1] \\ 1.106 \cdot \gamma^{0.145} & [0.1 < \gamma < 0.5] \\ 1 & [\gamma \geq 0.5] \end{cases} \quad (3.6)$$

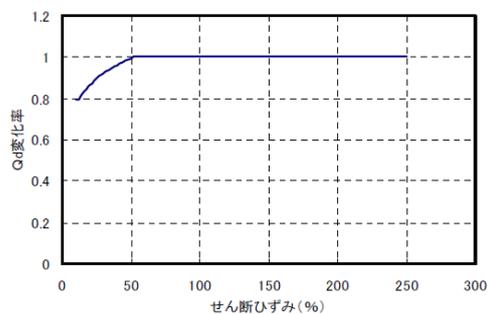
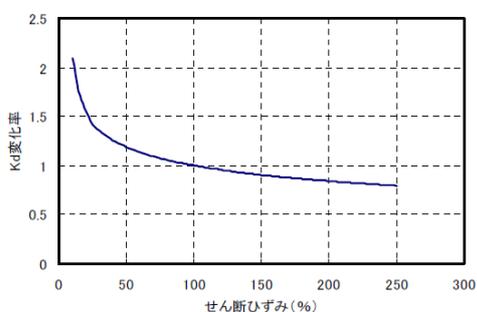


図 付 1-1 製品 A,B 及び D の LRB 2 次剛性のひずみ依存性 CKd,
降伏荷重の歪み依存性 CQd

$$K2(\gamma) = \begin{cases} 0.778 \cdot \gamma^{-0.5} \cdot K2(1) & (\gamma < 0.5) \\ (1.00 - 0.167 \cdot \ln(\gamma)) \cdot K2(1) & (0.5 \leq \gamma) \end{cases} \quad Qd(\gamma) = \begin{cases} (0.59 + 0.081 \cdot \ln(\gamma)) \cdot Qd(1) & (\gamma < 0.02) \\ (1.22 + 0.242 \cdot \ln(\gamma)) \cdot Qd(1) & (0.02 \leq \gamma < 0.2) \\ (1.00 + 0.101 \cdot \ln(\gamma)) \cdot Qd(1) & (0.2 \leq \gamma < 1.0) \\ (1.00 + 0.001 \cdot \ln(\gamma)) \cdot Qd(1) & (1.0 \leq \gamma) \end{cases}$$

γ : 任意ひずみ
 K2(1) : 100%ひずみ時の二次剛性
 Qd(1) : 100%ひずみ時の切片荷重

図 付 1-2 製品 C の LRB 降伏後剛性のひずみ依存性及び、降伏荷重の歪み依存性

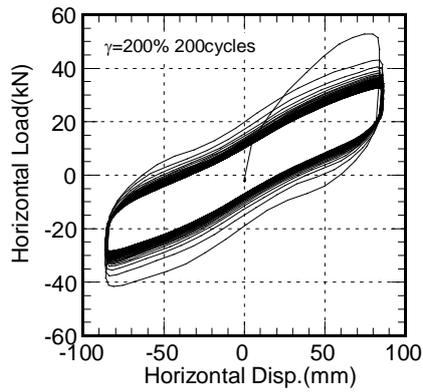


図 付 1-3 LRB 試験体の履歴特性 (φ 225)

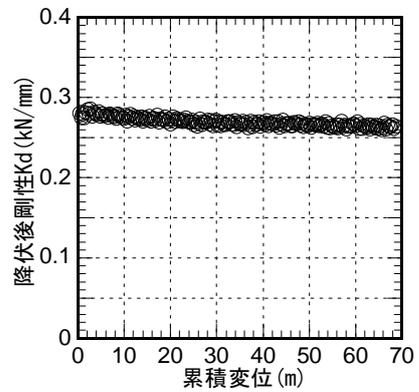
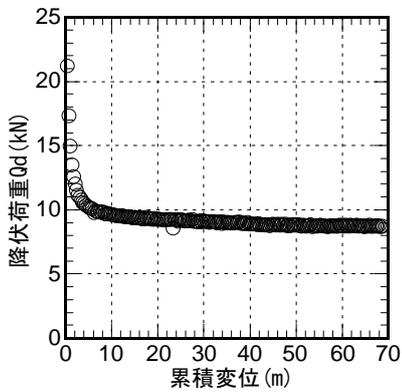


図 付 1-4 累積変位と降伏荷重の関係 図 付 1-5 累積変位と降伏後剛性の関係 (φ 225)

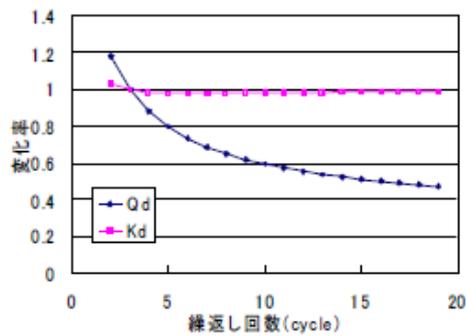


図 付 1-6 降伏荷重 (Qd) と降伏後剛性 (Kd) の変化 (φ 1,000)

LRB における多サイクルの繰り返し载荷による影響は、図付 1-3～図付 1-6 に示すように降伏荷重において顕著であり、累積変位または繰り返し回数とともに低下する⁴⁾。φ 1,000 の試験結果 (図付 1-6) によると、降伏荷重は 0.5 倍まで低下している。

(3) 高減衰積層ゴム (HDR)

調査対象は、製作会社2社のそれぞれ2品種で計4種類のHDRである。製造会社の技術資料及び日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-である。HDRの等価水平剛性の変化率は+側：0.37~0.51、-側：-0.12~-0.27である。

等価減衰定数のばらつきは等価水平剛性と独立ではないことから、等価水平剛性のばらつきをもとにそれに対応する等価減衰定数のばらつきを算出している。A,Bの評価においては等価剛性+側の際に等価減衰定数は-0.16、等価剛性-側の際に-0.01または+0.02としている。

表 付 1-6 高減衰積層ゴムの等価水平剛性に対する変動要因とばらつき幅

(a) +側

要因		特性	A	B	C	D	平均	最大
1	製造ばらつき	等価剛性	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
2	経年劣化	等価剛性	0.13	0.13	0.09	0.06	0.10	0.13
3	環境温度変化	等価剛性	0.14	0.17	0.17	0.35	0.21	0.35
合計		等価剛性	0.37	0.40	0.36	0.51	0.41	0.51

(b) -側

要因		特性	A	B	C	D	平均	最小
1	製造ばらつき	等価剛性	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10
2	経年劣化	等価剛性	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00
3	環境温度変化	等価剛性	-0.14	-0.15	-0.02	-0.17	-0.12	-0.17
合計		等価剛性	-0.24	-0.25	-0.12	-0.27	-0.22	-0.27

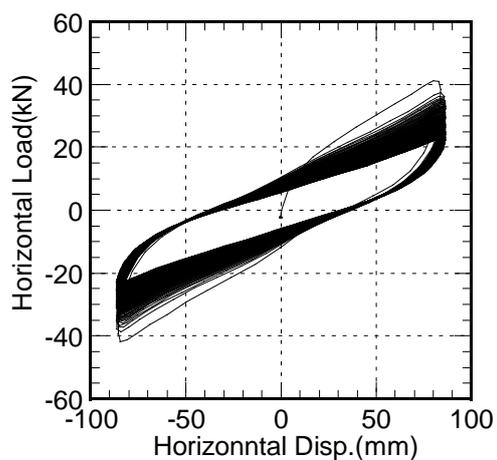
表 付 1-7 高減衰積層ゴムの等価減衰定数に対する変動要因とばらつき幅

(a) 剛性+側

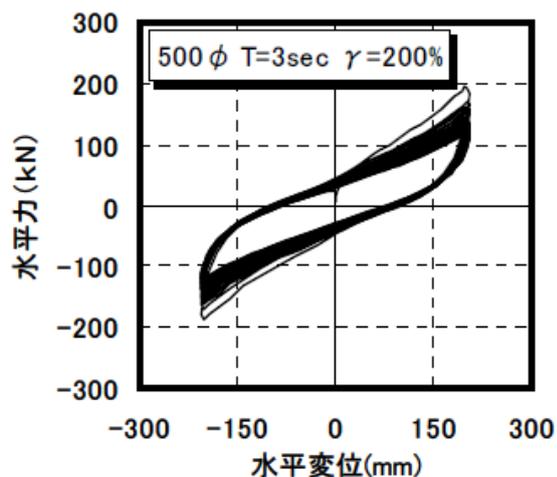
要因		特性	A	B	C	D	平均	最大
1	製造ばらつき	heq	-0.10	-0.10	-0.05	-0.10	-0.09	-0.10
2	経年劣化	heq	-0.10	-0.10	-0.15	-0.12	-0.12	-0.15
3	環境温度変化	heq	0.04	0.08	0.05	0.16	0.08	0.16
合計		heq	-0.16	-0.12	-0.15	-0.06	-0.12	-0.16

(b) 剛性-側

要因		特性	A	B	C	D	平均	最小
1	製造ばらつき	heq	0.10	0.10	0.15	0.10	0.11	0.15
2	経年劣化	heq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	環境温度変化	heq	-0.11	-0.08	-0.03	-0.05	-0.07	-0.11
合計		heq	-0.01	0.02	0.12	0.05	0.05	0.12



(a)試験 A ($\gamma = \pm 200\%$ 、200cycle)



(b)試験 B (100cycle)

図 付 1-7 HDR の正弦波繰り返し加振履歴特性

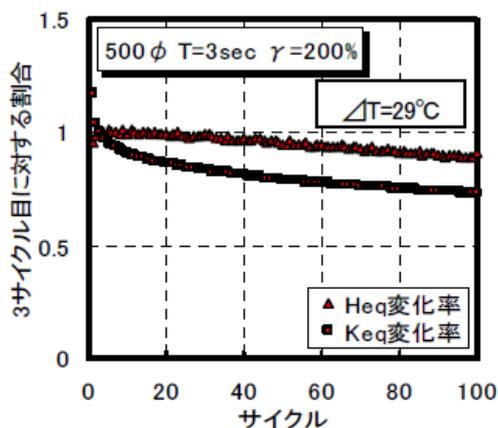


図 付 1-8 $\phi 500$ における繰り返し数と特性値変化

HDRにおいても、LRBと同様に多サイクルの繰り返し試験を実施し、その水平特性変化を求めている⁴⁾。履歴性状を示す図付1-7より、多サイクル加振により履歴形状が変化することがわかる。図付1-8より、等価減衰定数 (H_{eq}) よりも等価水平剛性 (K_{eq}) の低下度合いが大きいことがわかる。

(4) 弾性すべり支承

調査対象は製造会社4社の製品から計10製品である。変動ばらつき幅の出典は、製造会社の技術資料及び日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-である。弾性すべり支承の1次剛性の変化率は+側で0.55、-側で0.38となっている。製造のばらつきについては±20%が多いが、±30%としている部材も見られる。

摩擦係数については、告示の規定から製造のばらつきのみが列挙している。ここでは低摩擦タイプ（摩擦係数 $\mu = 0.01 \sim 0.03$ ）と高摩擦タイプ（ $\mu = 0.07 \sim 0.14$ ）に分類して表記した。

低摩擦タイプでは、各部材によって製造ばらつきが大きく異なっており、±20%のものもあれば、±50%までの変動を見込む製品も存在している。また高摩擦タイプでは、製造ばらつきは±22%であり、低摩擦タイプと比べ変動幅は小さい。

摩擦係数の面圧・速度依存性（表付1-9(b),(d)）から、摩擦係数の変化率は+側で低摩擦タイプ：最大0.77、高摩擦タイプ：0.50、-側では低摩擦タイプ：-0.59、高摩擦タイプで-0.65となっている。

表付1-8 弾性すべり支承の1次剛性のばらつき要因とその変化率

(a)+側

要因		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	平均	最大
1	製造ばらつき	0.30	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.20	0.20	0.20	0.30	0.24	0.30
2	経年劣化	0.10	0.15	0.15	0.20	0.10	0.16	0.15	0.20	0.20	0.10	0.15	0.20
3	環境温度変化	0.06	0.06	0.06	0.15	0.00	0.09	0.06	0.15	0.15	0.00	0.08	0.15
合計		0.46	0.41	0.41	0.55	0.40	0.55	0.41	0.55	0.55	0.40	0.47	0.55

(b)-側

要因		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	平均	最小
1	製造ばらつき	-0.30	-0.20	-0.20	-0.20	-0.30	-0.30	-0.20	-0.20	-0.20	-0.30	-0.24	-0.30
2	経年劣化	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	環境温度変化	-0.05	-0.06	-0.06	-0.05	0.00	-0.08	-0.06	-0.05	-0.05	0.00	-0.05	-0.08
合計		-0.35	-0.26	-0.26	-0.25	-0.30	-0.38	-0.26	-0.25	-0.25	-0.30	-0.29	-0.38

表 付 1-9 弾性すべり支承の摩擦係数におけるばらつき要因とその変化率

(a)低摩擦タイプ 基準値のばらつき

要因		特性	A	B	C	D	E	平均	最大
基準値		摩擦係数	0.015	0.029	0.029	0.011	0.013	0.019	
基準値速度		m/s	0.10	0.4	0.4	0.4	0.1	0.28	
基準値面圧 σ_0		N/mm ²	18	12/16	12/16	17/20	20	19	
1	製造ばらつき	+側	0.50	0.33	0.33	0.2	0.4	0.35	0.50
		-側	-0.50	-0.33	-0.33	-0.2	-0.4	-0.35	-0.50

(b)低摩擦タイプ 面圧・速度による変化率

要因		特性	A	B	C	D	E	平均	最大
2	速度依存	50kine 時	0.15	0.04	0.04	-	0.17	0.102	
		5kine 時	-0.06	-0.38	-0.38	-0.30	-0.07	-0.237	
3	面圧依存	2.0 σ_0	-0.30	-0.21	-0.21	-0.45	-0.40	-0.314	
		0.5 σ_0	0.42	0.26	0.26	0.50	0.60	0.408	
		+側	0.57	0.30	0.30	0.50	0.77	0.490	0.77
		-側	-0.36	-0.59	-0.59	-0.45	-0.47	-0.491	-0.59

(c) 高摩擦タイプ 基準値のばらつき

要因		特性	F	G	H	I	J	平均	最大
基準値		摩擦係数	0.13	0.136	0.094	0.075	0.1	0.107	
基準値速度		m/s	0.10	0.4	0.4	0.4	0.1	0.280	
基準値面圧 σ_0		N/mm ²	10	12/16	20/20	15/15	20	15	
1	製造ばらつき	+側	0.20	0.22	0.2	0.2	0.2	0.204	0.22
		-側	-0.20	-0.22	-0.2	-0.2	-0.2	-0.204	-0.22

(d) 高摩擦タイプ 面圧・速度による変化率

要因		特性	F	G	H	I	J	平均	最大
2	速度依存	50kine 時	0.15	0.01	-	-	0.0	0.053	
		5kine 時	-0.06	-0.19	-0.15	-0.30	-0.25	-0.190	
3	面圧依存	2.0 σ_0	-0.32	-0.19	-0.30	-0.45	-0.40	-0.332	
		0.5 σ_0	0.16	0.23	0.30	0.50	0.40	0.318	
		+側	0.31	0.24	0.30	0.50	0.40	0.350	0.50
		-側	-0.38	-0.38	-0.30	-0.45	-0.65	-0.432	-0.65

(5) 鋼材ダンパー

鋼材ダンパーの変動ばらつき幅の出典は、日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-である。鋼材ダンパーは、機械的諸特性に経年変化を生じることがないとし、水平特性の経年劣化による変化率はいずれも 1.0 としている。また周期変化による降伏荷重の変化率は、静的基準値に対する周期 1.1s、1.7s、2.8s 時の変化率である。

表 付 1-10 鋼材ダンパーの 1 次剛性の変動要因とその変化率

要因	特性	A	
		+側	-側
1 製造ばらつき	1 次剛性	0.10	-0.10
2 経年劣化	1 次剛性	0.00	0.00
3 環境温度変化	1 次剛性	0.00	0.00
4 周期変化	1 次剛性	0.00	0.00
合計	1 次剛性	0.10	-0.10

表 付 1-11 鋼材ダンパーの 2 次剛性の変動要因とその変化率

要因	特性	A	
		+側	-側
1 製造ばらつき	2 次剛性	0.00	0.00
2 経年劣化	2 次剛性	0.00	0.00
3 環境温度変化	2 次剛性	0.00	0.00
4 周期変化	2 次剛性	0.00	0.00
合計	2 次剛性	0.00	0.00

表 付 1-12 鋼材ダンパーの降伏荷重の変動要因とその変化率

要因	特性	A	
		+側	-側
1 製造ばらつき	降伏荷重	0.10	-0.10
2 経年劣化	降伏荷重	0.00	0.00
3 環境温度変化	降伏荷重	0.03	-0.03
4 周期変化	降伏荷重	0.07	0.00
合計	切片荷重	0.20	-0.13

(6) 鉛ダンパー

鉛ダンパーの変動ばらつき幅の出典は、日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-である。鉛ダンパーは、機械的諸特性に経年変化を生じることがないとし、水平特性の経年劣化による変化率はいずれも 1.0 としている。また周期変化による降伏荷重の変化率は、周期 3 秒に対する周期 2s 時の変化率である。

表 付 1-13 鉛ダンパーの 1 次剛性の変動要因とその変化率

	要因	特性	A	
			+側	-側
1	製造ばらつき	1 次剛性	0.20	-0.20
2	経年劣化	1 次剛性	0.00	0.00
3	環境温度変化	1 次剛性	0.00	0.00
4	周期変化	1 次剛性	0.00	0.00
	合計	1 次剛性	0.20	-0.20

表 付 1-14 鉛ダンパーの 2 次剛性の変動要因とその変化率

	要因	特性	A	
			+側	-側
1	製造ばらつき	2 次剛性	0.00	0.00
2	経年劣化	2 次剛性	0.00	0.00
3	環境温度変化	2 次剛性	0.00	0.00
4	周期変化	2 次剛性	0.00	0.00
	合計	2 次剛性	0.00	0.00

表 付 1-15 鉛ダンパーの降伏荷重の変動要因とその変化率

	要因	特性	A	
			+側	-側
1	製造ばらつき	降伏荷重	0.10	-0.10
2	経年劣化	降伏荷重	0.00	0.00
3	環境温度変化	降伏荷重	0.07	-0.07
4	周期変化	降伏荷重	0.03	0.00
	合計	切片荷重	0.20	-0.17

2. 種々の免震部材からなる免震層の復元力特性におけるばらつき幅について

(1) すべり支承なし、外付けダンパーなしの場合

a. LRB 単体および LRB+NR

1) 弾性部分（2次剛性）の変動

1.(1)および(2)より、

+側：0.26～0.31

-側：-0.15～-0.30

2) 切片荷重の変動

LRB の切片荷重のばらつきにより決まる。1.(2)より

+側：0.33～0.44

-側：-0.27～-0.31

b. HDR 単体

=等価水平剛性と等価粘性減衰定数にて評価するとした場合=

1) 等価水平剛性の変動

1.(3)より、

+側：0.37～0.51、このとき等価粘性減衰定数-0.06～-0.16

-側：-0.12～-0.27、このとき等価粘性減衰定数-0.01～+0.12

(2) すべり支承あり、外付けダンパーなしの場合

a. NR+すべり支承

全体としてバイリニアにて表現しうる。

1) 弾性部分（2次剛性）の変動

天然ゴム系積層ゴムのばらつきと等しくなる。1.(1)より

+側：0.21～0.30

-側：-0.12～-0.20

2) 切片荷重の変動

切片荷重のばらつきは、摩擦係数の製造ばらつき、速度および面圧依存性の和とする。

1.(4)より、

(低摩擦タイプ： $\mu=0.01\sim0.03$ の場合)

+側：0.6～1.17

-側：-0.65～-0.89

(高摩擦タイプ： $\mu=0.07\sim0.14$ の場合)

+側：0.46～0.70

-側：-0.58～-0.85

b. LRB+すべり支承、NR+LRB+すべり支承

全体としてバイリニアとして表現する。

1) 弾性部分（2次剛性）の変動

天然ゴム系積層ゴムまたは LRB のばらつきと等しくなる。1.(1)および(2)より、

+側：0.26～0.31

-側：-0.15～-0.30

2) 切片荷重の変動

LRB の切片荷重の基準値の総和を ${}_{lrb}Q_d$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_{lrb}\beta_d$ 、すべり支承の鉛直荷重を P 、摩擦係数の基準値を ${}_s\mu$ 、摩擦係数のばらつきを表現する係数を ${}_s\beta$ とすると、

$$+側 : \frac{{}_{lrb}Q_d \cdot {}_{lrb}\beta_d (+) + P \cdot {}_s\mu \cdot {}_s\beta (+)}{{}_{lrb}Q_d + P \cdot {}_s\mu \cdot {}_s\beta}$$

$$-側 : \frac{{}_{lrb}Q_d \cdot {}_{lrb}\beta_d (-) + P \cdot {}_s\mu \cdot {}_s\beta (-)}{{}_{lrb}Q_d + P \cdot {}_s\mu \cdot {}_s\beta}$$

例として、LRB とすべり支承からなる免震層を有する免震構造物を考える。

免震層の降伏せん断力係数を 0.04、LRB とすべり支承の軸力分担比を 85:15 とし、摩擦係数を 0.03（低摩擦タイプ）とし、ばらつき幅を(2) 2)より 1.17~-0.89 とする。

=免震層の切片荷重のばらつき=

$$+側のばらつき比率 : (0.0355Wg*(1+0.31)+0.0045Wg*(1+1.17))/0.04Wg=1.41 \rightarrow 1.41-1.00=\underline{+0.41}$$

$$-側のばらつき比率 : (0.0355Wg*(1-0.30)+0.0045Wg*(1-0.89))/0.04Wg=0.63 \rightarrow 0.63-1.00=\underline{-0.37}$$

(3) すべり支承なし、弾塑性系ダンパーありの場合

a. NR+弾塑性系ダンパー

全体としてバイリニア特性となる。

1) 弾性剛性（2次剛性）の変動

NR の水平剛性の基準値の総和を ${}_{nr}K$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_{nr}\beta$ 、弾塑性系ダンパーの2次剛性の基準値の総和を ${}_bK_2$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_b\beta_2$ とすると、

$$+側 : \frac{{}_{nr}K \cdot {}_{nr}\beta (+) + {}_bK_2 \cdot {}_b\beta_2 (+)}{{}_{nr}K + {}_bK_2}$$

$$-側 : \frac{{}_{nr}K \cdot {}_{nr}\beta (-) + {}_bK_2 \cdot {}_b\beta_2 (-)}{{}_{nr}K + {}_bK_2}$$

ただし、鋼材ダンパーおよび鉛ダンパーの2次剛性のばらつき幅は 0 と規定されているため、免震層全体の2次剛性の基準値に対するばらつき比率は、NR の剛性ばらつき比率よりも小さくなる。

2) 降伏荷重のばらつき

弾塑性ダンパーの降伏荷重のばらつき幅と等しくなる。1.(5)および(6)より

+側 : 0.20 程度

-側 : -0.13~-0.17

b. NR+LRB+弾塑性系ダンパー

全体としてバイリニアとして表現する。

1) 弾性剛性（2次剛性）の変動

NRの水平剛性の基準値の総和を ${}_{nr}K$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_{nr}\beta$ 、LRBの2次剛性の基準値の総和を ${}_{lrb}K_2$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_{lrb}\beta_2$ 、弾塑性系ダンパーの2次剛性の基準値の総和を ${}_bK_2$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_b\beta_{K2}$ とすると、

$$+側 : \frac{{}_{nr}K \cdot {}_{nr}\beta (+) + {}_{lrb}K_2 \cdot {}_{lrb}\beta_2 (+) + {}_bK_2 \cdot {}_b\beta_{K2} (+)}{{}_{nr}K + {}_{lrb}K_2 + {}_bK_2}$$

$$-側 : \frac{{}_{nr}K \cdot {}_{nr}\beta (-) + {}_{lrb}K_2 \cdot {}_{lrb}\beta_2 (-) + {}_bK_2 \cdot {}_b\beta_{K2} (-)}{{}_{nr}K + {}_{lrb}K_2 + {}_bK_2}$$

ただし、鋼材ダンパーおよび鉛ダンパーの2次剛性のばらつき幅は0と規定されているため、免震層全体の2次剛性の基準値に対するばらつきの比率は、NRおよびLRBの剛性ばらつきの比率よりも小さくなる。

2) 降伏荷重のばらつき

LRBの切片荷重の基準値の総和を ${}_{lrb}Q_d$ 、ばらつきを表現する係数を ${}_{lrb}\beta_d$ 、弾塑性系ダンパーの降伏荷重の基準値の総和を ${}_bQ_d$ 、摩擦係数のばらつきを表現する係数を ${}_b\beta_{Qd}$ とすると、

$$+側 : \frac{{}_{lrb}Q_d \cdot {}_{lrb}\beta_d (+) + {}_bQ_d \cdot {}_b\beta_{Qd} (+)}{{}_{lrb}Q_d + {}_bQ_d}$$

$$-側 : \frac{{}_{lrb}Q_d \cdot {}_{lrb}\beta_d (-) + {}_bQ_d \cdot {}_b\beta_{Qd} (-)}{{}_{lrb}Q_d + {}_bQ_d}$$

ただし、鋼材ダンパー及び鉛ダンパーの降伏荷重のばらつき幅は基準値に対して+側0.20、-側-0.17であり、LRBの切片荷重のばらつき幅よりも小さいため、免震層全体の切片荷重のばらつきは、基準値の切片荷重の総和に対してLRBのばらつき幅+側：0.33～0.44、-側：-0.27～-0.31よりも小さくなる。

(4) 積層ゴム+すべり支承+弾塑性系ダンパー

天然ゴム系積層ゴムおよびLRBを用いる場合は、全体をバイリニア特性として表現し、2. および3. の計算方法を組み合わせることにより、全体系の2次剛性および切片荷重のばらつきを求める。

HDRを使用する場合は、それぞれの復元カーループを足し合わせた場合の等価水平剛性および等価粘性減衰定数を求める。これは想定する免震層変位に依存する。

弾性剛性のばらつき幅は、積層ゴムの2次剛性分のばらつき幅を見ておけば安全側に評価できる。

降伏荷重のばらつきについては、以下に具体例を示す。

例. 免震層の構成は、NR、LRB、弾性すべり支承（摩擦係数：0.015）および履歴系ダンパーから成るとする。免震層全体の降伏せん断力係数は0.055とする。

弾性すべり支承の負担軸力比は全体の 0.5 とする。また、LRB と履歴ダンパーの降伏耐力比は 4 : 6 とする。

各部材の降伏荷重のばらつきは以下とする。

	(+側)	(-側)
LRB	+0.31	-0.30
履歴系ダンパー	+0.20	-0.17
弾性すべり支承	+1.17	-0.89

弾性すべり支承の降伏荷重（摩擦力）は、
 $0.5W_g \times 0.015 = 0.0075W_g$ (W_g : 建物重量)

=免震層の切片荷重のばらつき=

+側のばらつき比率：

$$((0.055 - 0.0075) * W_g * 0.40 * (1 + 0.31) + (0.055 - 0.0075) * W_g * 0.60 * (1 + 0.20) + 0.0075W_g * (1 + 1.17)) / 0.055W_g$$

$$= 1.37 \rightarrow 1.37 - 1.00 = \underline{+0.37}$$

-側のばらつき比率：

$$((0.055 - 0.0075) * W_g * 0.40 * (1 - 0.30) + (0.055 - 0.0075) * W_g * 0.60 * (1 - 0.17) + 0.0075W_g * (1 - 0.89)) / 0.055W_g$$

$$= 0.68 \rightarrow 0.68 - 1.00 = \underline{-0.32}$$

【参考文献】

- 1) 昭和電線デバイステクノロジー株式会社 技術資料
- 2) 東洋ゴム工業株式会社 技術資料
- 3) 日本免震構造協会：免震部材標準品リスト－2005－，2005
- 4) 清水建設株式会社，社団法人日本免震構造協会：平成 20 年度 建築基準整備促進事業 「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書，2009.