

# 鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面 圧下における限界変形能力

# ULTIMATE DEFORMATION CAPACITY OF LEAD RUBBER BEARING UNDER COMPRESSION

高山峯夫 - - \*1  
森田慶子 - - \*2

Mineo TAKAYAMA ----\*1  
Keiko MORITA -----\*2

キーワード:

免震構造、積層ゴム、動的試験、鉛、限界性能

Keywords:

Seismic isolation, Rubber bearing, Dynamic test, Lead, Ultimate capacity

This paper presents the experimental results of ultimate deformation capacity and energy dissipation capacity of lead rubber bearings. The lead rubber bearing absorbs the energy in lead plug (circular rod) inserted center. The effect of the interaction of lead plug and laminated rubber bearing has not sufficiently been clarified. Using the two type specimens : test specimen including the lead plug and without lead plug, the ultimate performance of lead rubber bearing is confirmed. Based on the results of compressive shearing tests, the effect of lead plug on the characteristics of lead rubber bearing under the high compressive stress were clarified.

## 1. はじめに

鉛プラグ型積層ゴムは、積層ゴム中心に円柱状の鉛棒（プラグ）を圧入することで、積層ゴムがせん断変形した際にエネルギーを吸収させるものである。積層ゴムが圧縮荷重をうけると、ゴム層の中央部は静水圧状態となり、中央部ほど高い圧力となる。この状態でせん断変形をすると、ゴム層の圧力分布が転倒モーメントをうち消すように移動する。これにより積層ゴムは大変形時にも安定した能力が発揮可能となっている。ただし、せん断変形時には、積層ゴムの上下面の重複部分で圧縮荷重を支持するため積層ゴム部に発生する圧力はより高くなり、中間鋼板には面外曲げ変形が生じることがわかっている<sup>3)</sup>。

このように圧縮荷重を支持する積層ゴムの中心部は高い応力度（静水圧）が生じており、この部分に孔をあけることは荷重支持を行う上で不利である。一方、鉛プラグを圧入することで、中心孔は中空ではなくなるため荷重支持の性能が大きく低下することはないとも言われている。しかし、積層ゴムの中にある鉛プラグがどのような挙動をしているのか、積層ゴムと鉛プラグとの相互作用はどうなっているのかなどについて、十分解明されてきていないのが現状である。

そこで、本論文では、実大製品（直径 800 mm）の縮小試験体である 300 mm 試験体を用いて限界特性試験を実施し、鉛プラグ型積層ゴムの高面圧下・大変形域での挙動、鉛プラグの効果などについて考察する。

## 2. 試験体と試験方法

試験体の形状を図 1 に示す。試験体は直径 800mm の製品を寸法比 1/2.67 に縮小している。なお、取り付け部分には縮小比が適用されていない。試験体の直径は 300mm、ゴム一層厚は

1.875mm で 40 層（全ゴム層厚 75mm）、中間鋼板厚は 1.2mm である。1 次形状係数  $S_1$  は中心孔（鉛プラグ）を無視すれば 40.0、中心孔を考慮すれば 32.0 である。2 次形状係数  $S_2$  は 4.0 である。試験体の外周には被覆ゴム（厚 10mm）が一体成型されている。ゴム材料のせん断弾性率  $G$  は  $4\text{kg/cm}^2$  相当である。

鉛プラグの直径は 60mm である。鉛材には純鉛（純度 99.99% 以上）を用いている。試験では、鉛プラグを圧入せずに中空のままとした試験体 3 体（RB 試験体と略す）と鉛プラグを圧入した試験体 3 体（LRB 試験体と略す）、計 6 体を使用した。

試験では、圧縮試験と圧縮せん断試験を実施した。表 1 に面圧とせん断ひずみの関係を示す。[ ] 内の数値は加振順序を示す。圧縮試験では、圧縮荷重 0 ~ 135ton（面圧  $200\text{kg/cm}^2$ ）までの繰り返しを 5 サイクル行う。オフセットせん断ひずみが 0% と 200% の場合について実施する。圧縮試験は静的載荷とした。圧縮せん断試験では、表 1 に示すように面圧を 50 ~  $300\text{kg/cm}^2$  の範囲で、せん断ひずみを 100%、200%、300% と変化させた。繰り返し数は 5 サイクルである。加振[17]終了後、繰り返し試験（せん断ひずみ 300%、30 サイクル）と大変形試験（せん断ひずみ 360%）を実施した。水平方向の加振は正弦波加振とし、表 1 に示すように各試験体ごとに振動数を設定した。RB1 と LRB1 試験体は 0.01Hz での加振であり、静的な加振とみなせる。RB3 と LRB3 試験体では加振装置の最大速度の制限から加振振動数が変化している。なお、RB1、LRB1 試験体では加振条件[17]の載荷中に試験体が圧壊したため、その他の試験体では試験条件[17]は除外している。各加振を開始するにあたっては上昇した鉛プラグの温度をある程度低下させるため、一定時間のインターバルをおいている。

\*1 福岡大学工学部建築学科 助教授 工博  
(〒814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

\*2 福岡大学工学部建築学科 助手

\*1 Assoc. Prof., Faculty of Eng., Fukuoka Univ., Dr.Eng.

\*2 Research Assistant, Faculty of Eng., Fukuoka Univ.

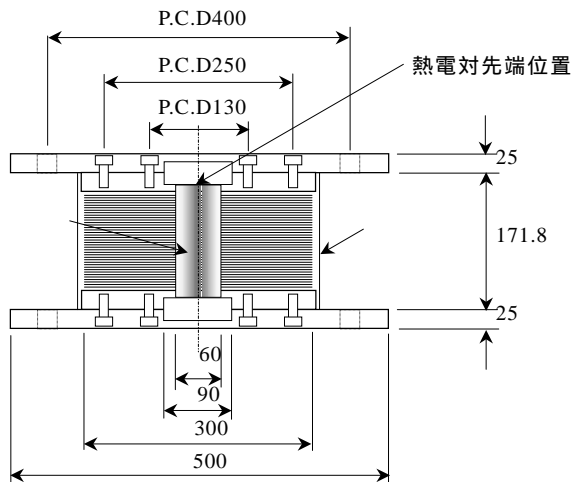


図1 試験体断面図

使用した試験装置は、試験体を載せたテーブルがリニアガイド上をアクチュエータで水平方向に加振される方式である。試験装置の仕様は、圧縮最大荷重 300ton、水平最大荷重 ±30ton、最大ストローク ±500mm、最大速度 30cm/s である。水平荷重と鉛直荷重は試験体上部に設置されている 2 分力計により測定される。試験体の鉛直変形は試験体の両サイドに設置した 2 台の変位計で計測した。鉛プラグ上部には熱電対を挿入し(図 1 参照) 鉛プラグの温度を計測した。なお、鉛直荷重はいずれの試験でも設定値に対してほぼ - 10% の範囲内で制御されている。

表1 面圧と加振ひずみの組み合わせ

試験内容	面圧 (kg/cm <sup>2</sup> )	せん断ひずみ			
		0%	100%	200%	300%
圧縮	0 ~ 200	[1]	-	[7]	-
圧縮せん断	50	-	[2]	[8]	[13]
	100	-	[3]	[9]	[14]
	150	-	[4]	[10]	[15]
	200	-	[5]	[11]	[16]
	300	-	[6]	[12]	[17]
圧縮せん断時の加振振動数	RB1	-	0.01Hz		
	LRB1	-	0.01Hz		
	RB2	-	0.10Hz		
	LRB2	-	0.10Hz		
	RB3	-	0.80Hz	0.40Hz	0.25Hz
	LRB3	-	0.80Hz	0.40Hz	0.25Hz

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 試験結果の評価方法

圧縮剛性は、圧縮試験から得られた 3 サイクル目の履歴曲線において、20ton 刻みごとに負荷曲線と除荷曲線から鉛直剛性を算出し、負荷時と除荷時の剛性を平均して求める。

水平剛性は、切片剛性  $K_d$ 、接線剛性  $K_t$ 、割線剛性  $K_s$  の 3 通りを求めた(図 2 参照)。剛性の算出には 3 サイクル目の履歴曲線を用いた。切片剛性  $K_d$  は、(1)式に示すようにせん断力  $Q$  が正側のときに水平変位 +10mm の点でのせん断力と変位 -10mm でのせん断力を用いて算出した剛性  $K_d^+$  と同様にして求めたせん断力が負側のときの剛性  $K_d^-$  を平均して求めた。接線剛性  $K_t$  は、切片剛性  $K_d$  と同様に水平変位 ±40mm 間で求めた剛性である。

$$K_d = \frac{K_d^+ + K_d^-}{2}, \quad K_t = \frac{K_t^+ + K_t^-}{2} \quad (1)$$

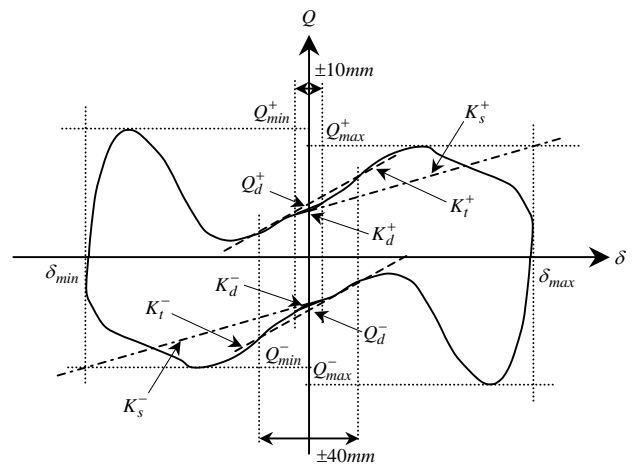


図2 水平荷重・降伏荷重の算出

割線剛性  $K_s$  は、切片荷重と最大荷重点を結んだ剛性である。最大荷重  $Q_{max}$  は、図 2 にあるように変位正側において負荷曲線の最大荷重  $Q_{max}^+$  と除荷曲線の最大荷重  $Q_{max}^-$  の大きい方の値としている。同様に、変位負側の最大荷重を  $Q_{min}$ 、y 軸と履歴曲線の交点(切片荷重)をせん断力の正側と負側で  $Q_d^+, Q_d^-$ 、正側と負側の最大変位を  $\delta_{max}, \delta_{min}$  とし、割線剛性  $K_s$  は次式で求める。

$$K_s = \frac{K_s^+ + K_s^-}{2} \quad (2)$$

$$\text{ここで、} K_s^+ = \frac{Q_{max} - Q_d^+}{\delta_{max}}, \quad K_s^- = \frac{Q_{min} - Q_d^-}{\delta_{min}}$$

降伏荷重  $Q_d$  は、せん断力の正側と負側の切片荷重を用いて(3)式より求める。

$$Q_d = \frac{|Q_d^+| + |Q_d^-|}{2} \quad (3)$$

#### 3.2 圧縮試験

図 3 に RB2 と LRB2 試験体における圧縮荷重と圧縮変位の関係を示す。他の試験体もほぼ同じ結果である。せん断ひずみ 200% 時の履歴特性から、鉛プラグの有無は荷重支持性能に与える影響が大きいことが分かる。図 4 には図 3 の 3 サイクル目の履歴曲線から算出した圧縮剛性と鉛直荷重の関係を示す。

鉛直剛性  $K_V$  の計算値を文献 1) に示される次式より求める。

$$K_V = \frac{E_{cb}A}{T_R} \quad (4)$$

$$\text{ここで、} E_{cb} = \frac{E_c E_b}{E_c + E_b}, \quad E_c = 3G(1 + 2\kappa S_1^2),$$

$T_R$  : 全ゴム層厚,  $A$  : 断面積

ゴムの材料特性として、せん断弾性率  $G$  は 4.75kg/cm<sup>2</sup> (表 2 に示す RB 試験体の水平剛性 0.43t/cm より逆算した値)、体積弾性率  $E_b$  は 15t/cm<sup>2</sup>、ゴム硬度による補正係数  $\kappa$  は 0.85 を用いる。鉛プラグがある場合の断面積には鉛プラグの断面も含めている。(4)式より、鉛プラグが圧入されている場合(1 次形状係数  $S_1=40$ )、圧縮剛性は 1020t/cm、鉛プラグがない場合( $S_1=32$ )の圧縮剛性は 846t/cm と得られる。これらの計算式はオフセットせん断ひずみがない場合の鉛直剛性に対応している。オフセ

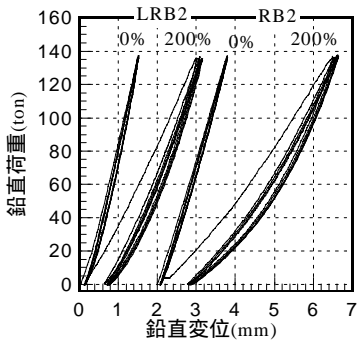


図3 鉛直荷重 - 鉛直変位関係

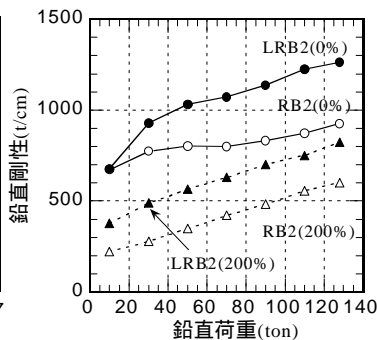


図4 鉛直剛性 - 鉛直荷重の関係

ットせん断ひずみが 200% (150mm 変形) の時、積層ゴムの有効支持部分 (上下面の重複部分) の面積  $A_e$  は、

$$A_e \cong \left[ 1 - 1.2 \frac{\delta}{D} \right] A \quad \left( \frac{\delta}{D} \leq 0.6 \right) \quad (5)$$

より、約 40% となる。オフセット変形を与えた時の鉛直剛性は、RB 試験体ではほぼ 0.4 倍に低下している。LRB 試験体では、鉛直剛性の低下率は(5)式の予測よりも小さくなっている。このことは鉛プラグの影響が現れたものと考えられる。しかし、鉛プラグの形状や圧入時の方法が圧縮剛性に与える影響については課題が残されている。

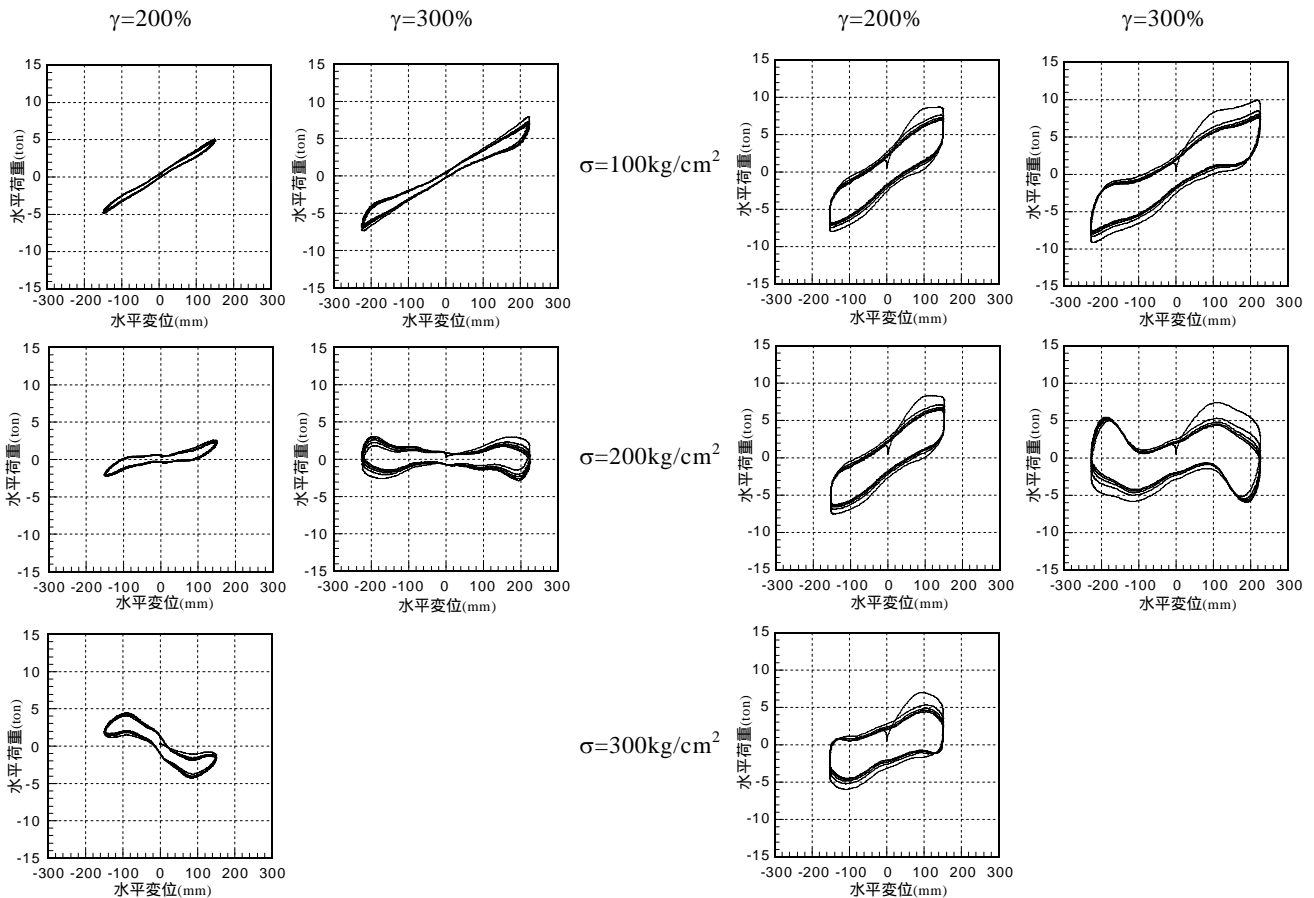
### 3.3 圧縮せん断試験

図5にはLRB2とRB2の基本特性試験での水平荷重 - 水平変位関係を示す。加振振動数を変えた他の試験体の結果もほぼ同

様の傾向を示す。ただし、LRB 試験体の履歴曲線の 1 波目のせん断抵抗力は、振動数 0.01Hz では 2 波目の履歴特性と大きく異なるものの、加振振動数が大きくなると顕著となっている。LRB2 試験体のせん断ひずみ 100% ではほぼバイリニア型の履歴曲線を示すが、せん断ひずみ 200% 以上では面圧の上昇にともない水平剛性の低下と水平履歴に負勾配の発生が見られるようになる。鉛プラグがない RB2 試験体では面圧 200kg/cm<sup>2</sup> 以上では変位 0mm 付近ですでに切片・接線剛性が負となり、座屈していることがわかる。

圧縮せん断試験時の鉛直沈み込み量は、せん断ひずみ 200% 以下であればそれほど大きくはないが、せん断ひずみ 300% では面圧の上昇とともに著しく大きくなる。RB 試験体では、面圧 50kg/cm<sup>2</sup> から 200kg/cm<sup>2</sup> の範囲で鉛直沈み込み量は 4.5mm ~ 11.7mm 程度、LRB 試験体では 3.3 ~ 10.3mm 程度であった。RB 試験体に比べ LRB 試験体の鉛直変形量は約 -24% (面圧 50kg/cm<sup>2</sup>) ~ -12% (面圧 200kg/cm<sup>2</sup>) である。しかし、面圧 200kg/cm<sup>2</sup> の時の鉛直変形量はゴム層厚の約 15% 相当であり、鉛直ひずみが非常に大きい。

図6にせん断ひずみ 200% の水平履歴の 3 サイクル目から算出した水平剛性と降伏荷重の面圧依存性を示す。水平剛性の図中に記載されている実線(LRB)と破線(RB)の曲線は次式の面圧依存性の理論式に基づいて回帰した曲線である。



(a)RB2 試験体

(b)LRB2 試験体

図5 水平荷重 - 水平変位関係 (基本特性試験)

$$\frac{K_H}{K_{H0}} = 1 - \left( \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \right)^2 \quad (6)$$

ここで、 $K_H$ ：水平剛性、 $K_{H0}$ ：面圧が0の時の水平剛性、 $\sigma$ ：面圧、 $\sigma_{cr}$ ：座屈面圧（水平剛性が0となる面圧）

当然ながらRB試験体はLRB試験体に比べ水平剛性の面圧依存性は大きくなる。加振振動数の違いによる水平剛性の違いも顕著ではない。最も面圧依存性を小さく評価する水平剛性は割線剛性 $K_s$ である。これは割線剛性の算出方法からも予想される結果である。接線剛性 $K_t$ と割線剛性 $K_s$ の傾向はほぼ一致している。最も面圧依存性を厳しく評価するのは切片剛性 $K_d$ である。切片剛性では変位0mm近傍での水平剛性を求めており、積層ゴムの座屈現象をより忠実に評価しているためと考えられる。本論文では切片剛性の算出では変位±10mm間の剛性としたが、複雑な履歴挙動を示す積層ゴムの水平剛性や水平安定性をどのように評価すべきかについては更なる検討が必要である。

(6)式に基づいて回帰された面圧依存性の曲線から、水平剛性 $K_{H0}$ と座屈面圧 $\sigma_{cr}$ を求めた結果を表2に示す。LRB試験体の水平剛性 $K_{H0}$ は鉛プラグの影響を受けてRB試験体よりも大きくなる傾向を示す。切片剛性 $K_d$ と接線剛性 $K_t$ では約1.24倍になっているが、割線剛性 $K_s$ では約1.05倍と差が小さくなる。これは、鉛プラグが水平剛性に与える影響が変形の小さい領域（せん断ひずみ50%程度以下）では大きく、ある程度変形が大きくなると影響は小さくなることを示している。座屈面圧は切片剛性に基づく場合が小さな面圧となる傾向が見られる。座屈

面圧の理論式<sup>1)</sup>に圧縮剛性の算出に用いた材料パラメータを代入すれば、RB試験体の座屈応力度は500kg/cm<sup>2</sup>、LRB試験体の座屈応力度は570kg/cm<sup>2</sup>となる。LRB試験体のせん断ひずみ100%の時の座屈応力度は理論値に最も近いものの、せん断ひずみが大きくなると理論値との差は大きくなる。同様に、RB試験体での座屈応力度は理論値の半分以下となっている。これから、文献1)に示される座屈理論式は本試験体のように積層ゴム外径の1/5程度の中心孔径を有する積層ゴムに適用した場合には過大評価となることに注意が必要である。

表2 面圧依存性の回帰式から得られた水平剛性と座屈面圧

$\gamma$	剛性	RB試験体		LRB試験体	
		$K_{H0}$ t/cm	$\sigma_{cr}$ kg/cm <sup>2</sup>	$K_{H0}$ t/cm	$\sigma_{cr}$ kg/cm <sup>2</sup>
100	Kd	0.472	216	0.586	424
	Kt	0.446	251	0.587	424
	Ks	0.428	241	0.448	507
200	Kd	0.460	195	0.492	344
	Kt	0.404	225	0.473	402
	Ks	0.426	235	0.358	391
300	Kd	0.392	167	0.485	233
	Kt	0.361	181	0.449	285
	Ks	0.431	177	0.450	157

降伏荷重の面圧依存性では面圧50～300kg/cm<sup>2</sup>の範囲でほぼ一定した降伏荷重2.2ton程度を示す。ただし、面圧100～200kg/cm<sup>2</sup>の範囲では、LRB1（加振振動数0.01Hz）の降伏荷重

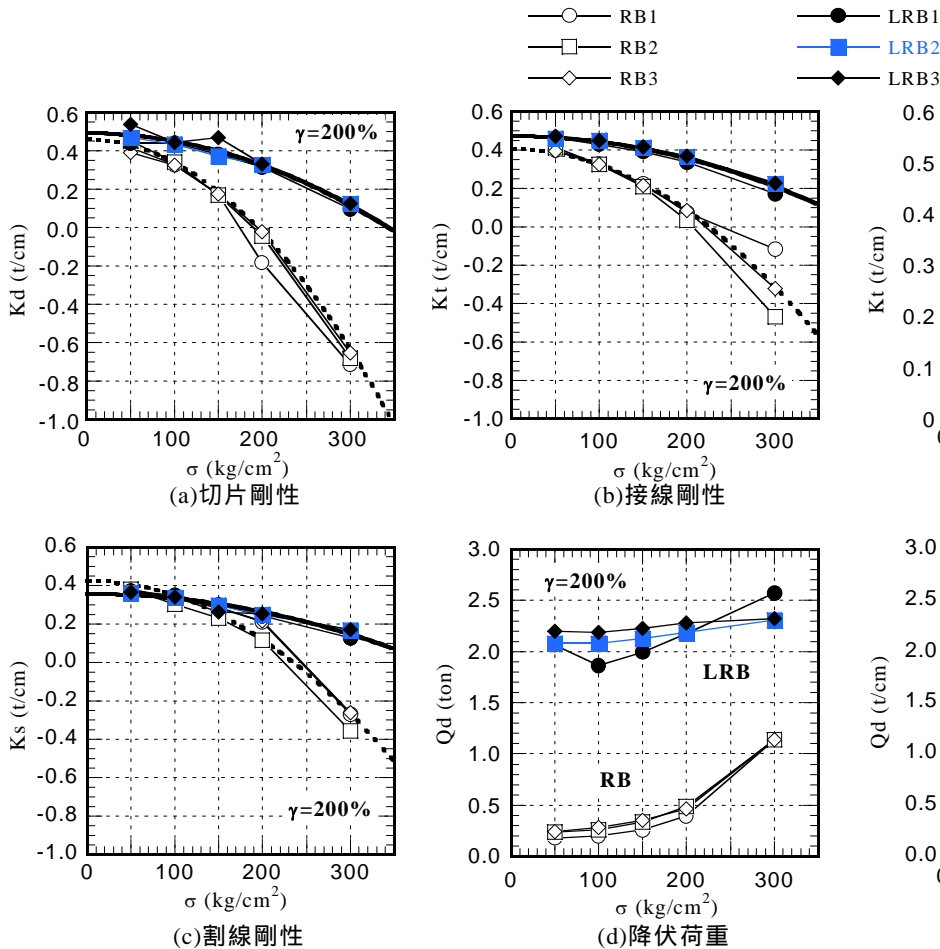


図6 面圧依存性 ( $\gamma=200\%$ )

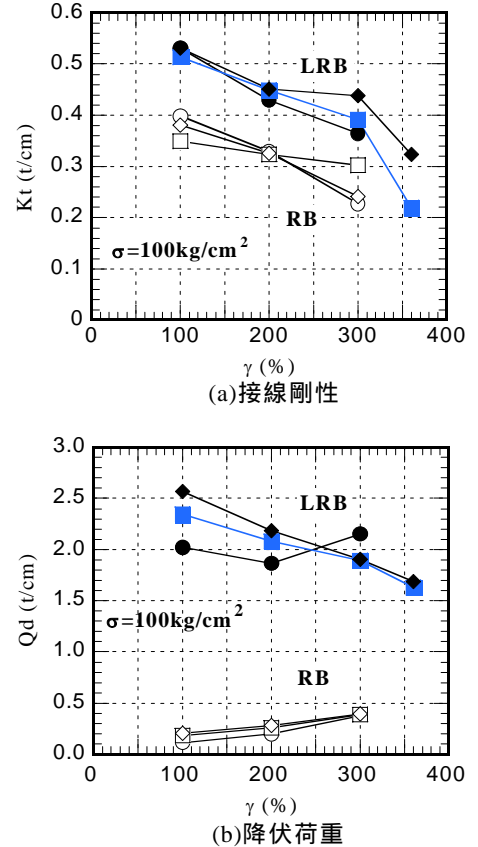


図7 ひずみ依存性 ( $\sigma=100$ kg/cm<sup>2</sup>)

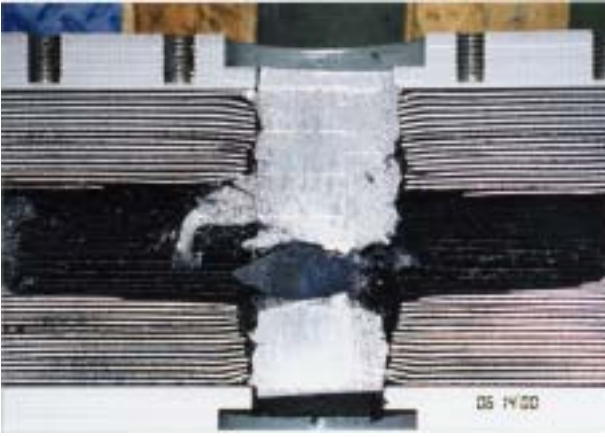


写真1 LRB1 試験体の圧破後の断面(加振直交面)



写真2 RB 試験体中心部分での中間鋼板の面外変形  
(加振平行面)

が最も低く、LRB3 (0.4Hz) が最も高い。これは降伏荷重の振動数依存性が現れたものと考えられる。降伏荷重 2.2ton を鉛プラグの断面積で除すれば、せん断応力は  $78\text{kg/cm}^2$  となる。鉛材料のせん断応力は約  $100\text{kg/cm}^2$  でほぼ一定で、せん断ひずみ 600%まで変形すると報告されている<sup>2)</sup>。LRB 試験体の試験から得られた鉛プラグの降伏せん断応力はこれよりも小さく、純せん断変形ではなく曲げ変形などの影響が含まれたものと考えるのが妥当であろう。同図中には RB 試験体でも同じ操作で求めた y 切片荷重を示している。面圧が高くなるに従い、履歴ループが膨らんできているのがわかる。これは通常の天然ゴム系積層ゴムでも見られる現象であるが、面圧  $200\text{kg/cm}^2$  越えた範囲での切片荷重の増加が大きいようである。

図7は面圧  $100\text{kg/cm}^2$  における接線剛性  $K_t$  と降伏荷重  $Q_d$  のせん断ひずみ依存性である。LRB 試験体における水平剛性のひずみ依存性は RB 試験体と同じような傾向を示している。降伏

荷重のひずみ依存性は LRB1 試験体では大きくないものの、その他の試験体ではせん断ひずみが大きくなるに従い、降伏荷重が低下している。ただ、せん断ひずみ 360%の場合を除けば、降伏荷重は 2.0~2.5ton の範囲にあり、ひずみ依存性は大きくないようにもみえる。これが、加振振動数の影響によるものかどうかについては更なる検討が必要である。

RB1 と LRB1 試験体では、面圧  $300\text{kg/cm}^2$ 、せん断ひずみ 300%の時に圧壊した。圧縮荷重を支持できなくなり、軸方向に潰れるようにして壊れた。LRB1 試験体の断面を観察するために中

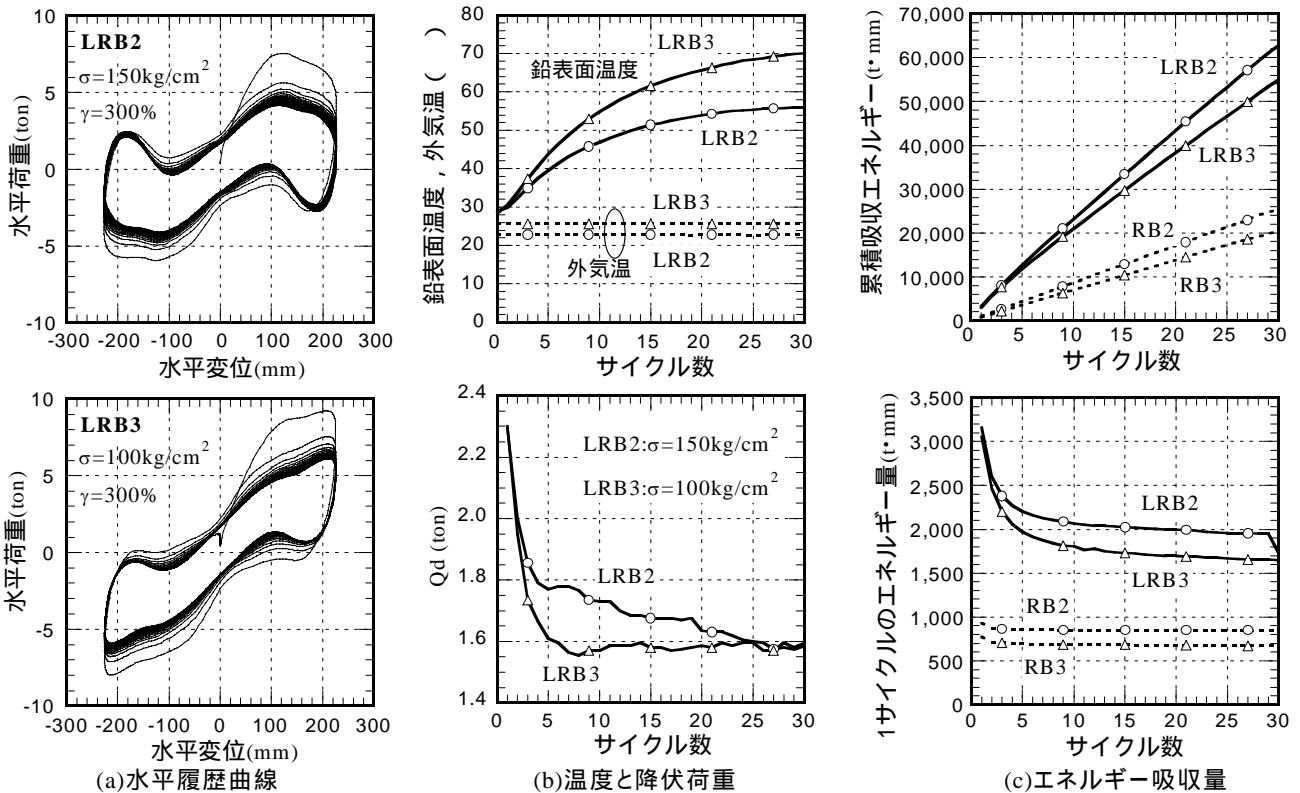


図8 繰り返し試験における履歴曲線と温度・エネルギー吸収量の変化

心部から切断した。写真 1 に LRB1 試験体の破断面を示す。この断面は加振方向に対して直交する断面である。断面の中央にある黒い部分（影になっている部分）が引張破断した中間鋼板である。せん断変形した状態で圧縮荷重を支持できなくなり、中間鋼板が引張破断した結果、積層ゴムの荷重支持が失われたと思われる。

写真 2 は、RB 試験体の加振終了後、切断した断面の中心孔部分の拡大写真である。カット面は加振方向に平行であり、写真は加振方向に平行な面を見ていることになる。中心孔の被覆ゴムを剥げば、中間鋼板がへろの字に屈曲していることが認められた。これは中間鋼板が面外変形により塑性ひずみが中心孔周辺へ集中した結果であると思われる。試験体形状は異なるが、FEM 解析結果から得られた中間鋼板の変形状態<sup>3)</sup>とよく似た変形を示している。中間鋼板に累積塑性変形が蓄積されることで、中間鋼板破断の原因となったものと考えられる。

### 3.4 繰り返し試験

繰り返し試験の結果を図 8 に示す。LRB2 試験体は面圧 150kg/cm<sup>2</sup>、LRB3 試験体は面圧 100kg/cm<sup>2</sup> である。最初の数サイクルで履歴曲線の形状が変化していることが認められる。降伏荷重は加振後から 5 サイクル程度まで最大 30% 低下している。5~10 サイクル以降はほぼ一定の降伏荷重を示すようになる。鉛表面温度は加振にともない単調に増加する。加振終了時、LRB2 試験体は 56、LRB3 では 70 に達した。累積エネルギー吸収量も加振サイクルに比例して増加するが、LRB2 試験体の方が高いエネルギー吸収量を示す。しかし、LRB2 試験体の温度上昇は LRB3 よりも低くなっており、この点からも鉛プラグの表面温度は鉛プラグの発熱の実体を捉えていない。鉛の比熱は 129J/(kg・K)=13t・mm/(kg・K)、融点は 327 である。LRB 試験体の鉛プラグの大きさ（直径 60mm、高さ 140mm）に密度（11.3g/cm<sup>3</sup>）を乗じて得られる重量は約 4.5kg となる。従って、鉛プラグが融点（温度上昇を 300K と想定）に達するまでに吸収するエネルギーは約 17,550t・mm となる。このエネルギー量を図 8 で LRB と RB の差分としてみれば 15 サイクル分に相当するものの、温度の上昇は 20~30 程度でしかない。LRB 試験体における鉛プラグの熱挙動に関しては熱伝導解析などによる検討が必要である。

RB 試験体においても LRB 試験体と同じ条件で繰り返し試験を実施している。RB 試験体の 1 サイクルのエネルギー吸収量は LRB 試験体（5 サイクル以降）の 40~45% 程度と結構大きなエネルギーを吸収していることになる。RB 試験体のエネルギー

吸収量から等価減衰定数を求めたところ、約 10% となった。通常、天然ゴム系積層ゴムの粘性減衰定数は 2~3% 程度といわれており、数倍高い減衰となっている。この原因としては、写真 2 で示したように中間鋼板の塑性変形によるエネルギー吸収が寄与したものと推測される。

### 3.5 安定限界変形

図 5 の履歴曲線において負勾配が発生した時点を積層ゴムの座屈ひずみと定義する。図 9 は、面圧と座屈ひずみの関係、及び表 3 の座屈面圧と加振ひずみの関係を描いたものである。圧縮せん断試験では面圧と加振変位は連続的に変化しているわけではないので、図中の負勾配発生点には当然ながらある程度幅がある。RB 試験体の安定限界領域は、せん断ひずみ 0% で面圧 300kg/cm<sup>2</sup> とせん断ひずみ 400% で面圧 0kg/cm<sup>2</sup> を結んだ直線に付近にあるようにもみえる。水平剛性の回帰曲線から得られた座屈面圧は若干大きい面圧を示すものの、傾向は負勾配発生点から求められた安定限界点と対応している。

LRB 試験体では、せん断ひずみ 100% では負勾配の発生は認められない。しかし、せん断ひずみ 150% 付近で負勾配発生が認められ、この変位領域では積層ゴムの挙動が大きく変化しているようにも推察される。座屈面圧は、負勾配発生面圧よりも大きな値を示しており、対応はとれない。この両者の差異の発生原因を探ることが、LRB 試験体の安定限界特性をどのように評価すべきかについて重要な示唆を与えると思われる。

### 4. まとめ

本論文では、鉛プラグ型積層ゴム製品の縮小試験体を用いて、圧縮せん断特性、繰り返し試験特性、限界変形特性について、鉛プラグの有無が与える影響に着目して実験を実施し、その結果について考察した。本試験から得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 鉛プラグの有無による試験結果より、鉛プラグの効果が定性的ではある事が明らかとなった。鉛プラグ型積層ゴムの水平剛性や安定限界変形の評価方法については更に検討が必要である。
- 2) 文献 1)などに示されている積層ゴムの座屈荷重の理論式では鉛プラグ型積層ゴムの座屈荷重を過大評価する傾向にある。鉛プラグ型積層ゴム製品については多数の実験結果に基づいて座屈限界などが決定されているものと推定される。このような実験結果を説明できる座屈理論式の修正あるいは新たな開発が求められる。
- 3) 高面圧下で圧壊した試験体は中間鋼板が薄かったことが原因の一つであると考えられる。中間鋼板の設計、特に中心孔が大きな場合の設計については今後の検討課題である。また、破壊しなくても中間鋼板に蓄積される累積塑性変形がアイソレータの性能に与える影響については更に検討が必要であろう。

### 謝辞

本試験の試験体の製作及び試験の実施にあたってはオイレ工業株式会社のご協力を得ました。ここに記し感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会「免震構造設計指針」2002
- 2) 池永雅良、藤田隆史「鉛の力学的特性 - その 2 鉛のねじり試験 -」日本建築学会大会学術講演梗概集、2001.9
- 3) 高山峯夫、多田英之、森田慶子「積層ゴムアイソレータ中間鋼板の設計 - その 4 中心孔を有する場合 -」日本建築学会大会学術講演梗概集、1994.9

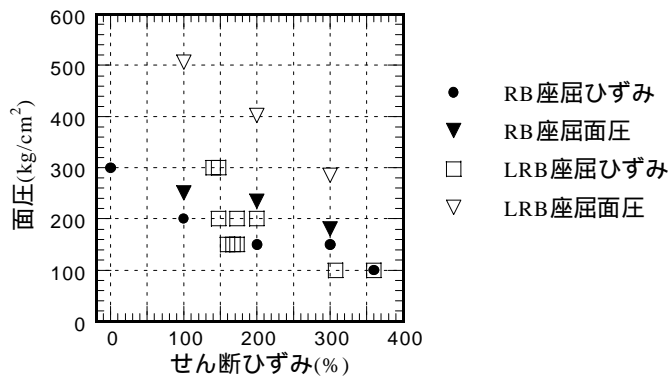


図 9 座屈ひずみと座屈面圧