

# 錫プラグ入り積層ゴム免震装置（SnRB）の開発

## Development of a Tin Rubber Bearing Isolator (SnRB)

鈴木 亨 TORU SUZUKI

原田 浩之 HIROYUKI HARADA

免制震技術部 光阪 勇治 YUJI MITSUSAKA

(株) 免制震デバイス 田中 久也 HISAYA TANAKA

錫をエネルギー吸収材料として使用した「錫プラグ入り積層ゴム免震支承(SnRB)」を開発した。錫素材は、延性・繰り返し性能・常温再結晶性に優れ、鉛と同等あるいはそれ以上の特性を持つ。実機試験結果より、その基本性能は鉛プラグ入り積層ゴムと同程度であり、さらに、高速加振試験・連続加振試験においても良好な結果を得た。また、装置の復元力特性はバイリニア型として評価できることがわかった。

**キーワード**：免震支承，錫プラグ，エネルギー吸収材料，連続加振，復元力特性

A “Tin Rubber Bearing Isolator” (SnRB) which uses tin as an energy absorption material has been developed. Tin has excellent ductility, repetition and re-crystallization performance under normal temperatures and shows equal or higher performance compared to lead. Loading tests on the actual isolator confirmed that the SnRB has the same basic performance as an LRB “Lead Rubber Bearing Isolator”. In addition, the SnRB demonstrated excellent performance in high-speed and long-term cyclic loading tests on half-model isolators. Moreover, it was clarified that hysteresis characteristic of the SnRB could be evaluated by the Bi-Linear model.

**Key Words**: Base Isolation, Tin Plug, Energy Absorption Material, Continuous Test, Hysteresis Characteristics

### 1. はじめに

減衰機能一体型積層ゴムとしては、従来鉛プラグ入り積層ゴムが使用されてきた。これは、鉛を振動エネルギー吸収材料として用いた場合、常温再結晶するため塑性変形による疲労が蓄積しないという特性があり、また延性に優れることから大変形にも追従可能となるためである。しかしながら近年、環境意識の高まりから各工業分野で非鉛化が進んでおり、建築分野でも非鉛製品の実用化が必要と考えられる。従来、非鉄金属においては鉛のみの特性が評価されてきたが、他の金属で同等の特性を確認できれば、エネルギー吸収材料として使用できるものと考えられる。

本報では、鉛以外の金属について、その機械特性からエネルギー吸収材料として使用可能かどうか評価を行い、その結果に基づいて開発した、錫（すず）プラグ入り積層ゴムの基本性能について報告する。

### 2. 非鉛金属の機械特性

容易に入手可能なアルミニウム・錫・亜鉛を用いて単軸引張り試験・単軸疲労試験を実施し、その機械特性からエネルギー吸収材料として使用可能かどうかを評価する。

#### (1) 単軸引張り試験

図-1に単軸引張り試験体の形状および寸法を示す。

試験は、恒温室内で20℃に保持した状態で、10mm/minの定速度にて加力した。図-2に本試験で得られた応力-ひずみ曲線を示す。鉛・錫・アルミニウムについては20%以上の伸びを示したが、亜鉛については2%で破断した。亜鉛は、結晶構造が六方稠密格子であるため、滑り面が少なく他の金属より延性が劣ると考える。一方、鉛・錫・アルミニウムの結晶構造は面心立方格子であり、格子の滑り面が大きいために延性に優れると考える。

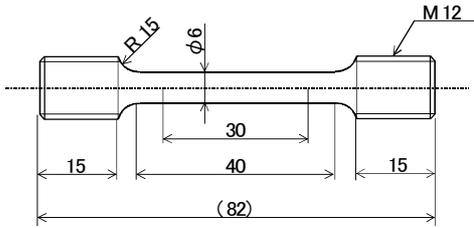


図-1 単軸引張試験体

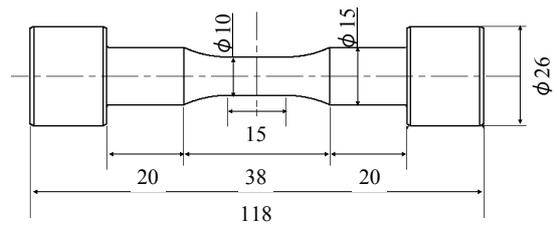


図-3 単軸疲労試験体

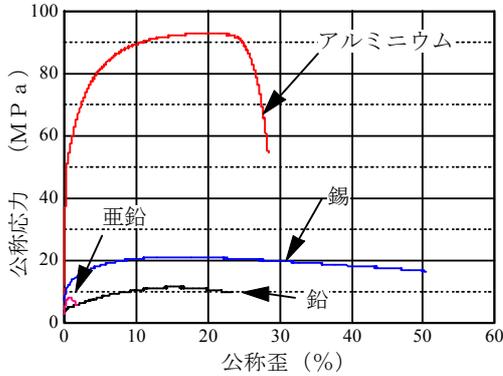


図-2 応力-ひずみ曲線

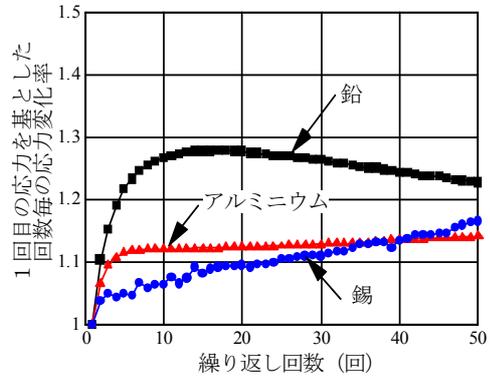


図-7 応力変化率

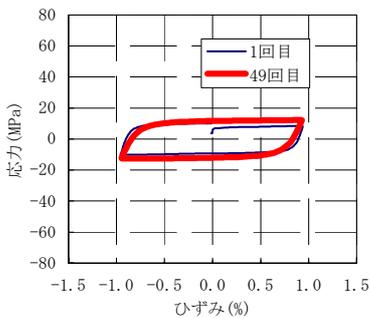


図-4 鉛の履歴曲線

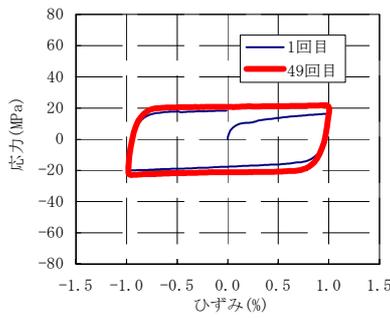


図-5 錫の履歴曲線

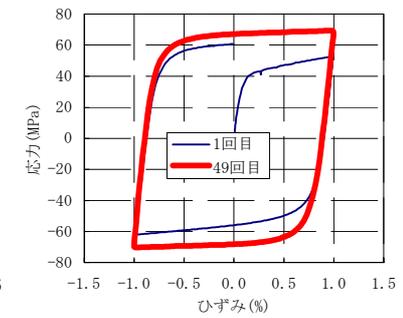


図-6 アルミニウムの履歴曲線

表-1 鉛・錫・アルミニウムの  
切片応力・剛性値・弾性限界ひずみ

項目	鉛	錫	アルミニウム
切片応力(MPa)*	12.9	19.2	61.3
剛性値(GPa)	17.6	51.9	61.0
弾性限界歪( $\times 10^{-4}$ )	7.33	3.70	10.0

\*1回目の歪み0点応力の平均値

表-2 各金属の熱物性値(20°C)

項目	単位	鉛	錫	アルミニウム	亜鉛
熱伝導率	W/m°C	35.1	64.9	204	113
比熱	J/°C・kg	129	226	932	385
再結晶温度	°C	~0°C	0~25°C	150~200°C	15~50°C

(2) 単軸疲労試験

図-3に単軸疲労試験体の形状および寸法を示す。

試験体は「単軸引張試験」において優れた延性が確認された鉛・錫・アルミニウムとした。試験は、恒温室にて20°Cに保持した試験体を周波数1.0Hzで、 $\pm 1.0\%$ のひずみを50回与え、履歴特性の変化を把握することとした。図4~6に各々の履歴曲線を示す。いずれの試験体も剛塑性型の履歴形状を示し、2次剛性は極めて小さい。1回目のひずみ0点応力の正負絶対値の平均値(=切片応力)とひずみ反転後の除荷剛性(=剛性値)、およびこれから求めた弾性限界ひずみ(切片応力/剛性値)は表-1に示すとおりである。図-7に、繰返し回数と1回目の切片応力を基準とした繰返し回数毎の応力変化率の

関係を示す。鉛は、加工硬化によって応力が上昇し、15回目は1回目よりも28%程度上昇しているが、これ以降は応力が低下する傾向を示した。一方、錫・アルミニウムは50回の繰返しとともに応力が上昇した。表-2の鉛・錫・アルミニウムの熱物性値<sup>1)</sup>に示すように、鉛は比熱および熱伝導率が他に比べ低いために塑性変形部で発生した熱が周囲に拡散せず、その温度上昇によって軟化したと考えられる。一方、錫やアルミニウムは熱が周囲に拡散されやすく、温度上昇は少なかったと考えられる。本試験から、最も繰返し性能が安定していたのはアルミニウムであった。

(3) 常温再結晶試験

単軸引張り試験前後における試験体(20°C)の断面

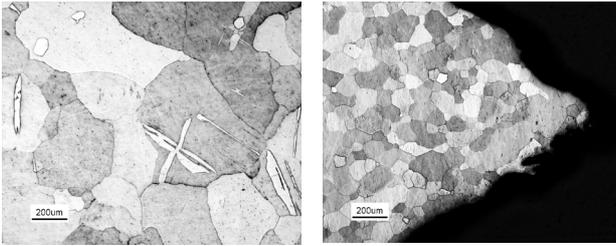


図-8 試験前の断面組織 図-9 試験2日後の断面組織

表-3 各金属の評価

	延性	繰り返し安定性	常温再結晶能力
錫	◎	○	◎
アルミニウム	○	◎	×
亜鉛	×	—	○

表-4 試験体仕様

サイズ	φ 800	φ 900	φ 1000
ゴム材料	天然ゴム G=0.39N/mm <sup>2</sup>		
プラグ材料	錫		
ゴム外径D(mm)	800	900	1,000
プラグ径d(mm)	160	180	200
ゴム1層厚さtr(mm)	6	7	8
ゴム層数n	33	29	27
ゴム総高さntr(mm)	198	197	203
ゴム部受圧面積A <sub>r</sub> (mm <sup>2</sup> )	482,549	610,726	753,982
プラグ断面積A <sub>d</sub> (mm <sup>2</sup> )	20,106	25,447	31,416
1次形状係数S <sub>1</sub>	32.0	31.8	32.0
2次形状係数S <sub>2</sub>	4.0	4.6	4.9
数量	3	2	1

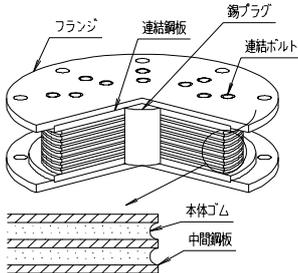


図-10 試験体構造

組織観察を行った。図-8に錫材料の試験前断面組織を、図-9に試験2日後の断面組織を示す。再結晶が起こらない場合、結晶粒は軸方向に伸ばされた形状となるが、再結晶が起こると結晶粒は小さくほぼ円形の形状となる<sup>2)</sup>。図-8,9より、試験前の錫結晶粒と比較して試験後の錫結晶粒は、粒径は小さくなり形状も円形に近くっており、常温において再結晶していることが確認できる。アルミニウムの場合、再結晶温度が150~200℃と高く、常温での再結晶は不可能であると考えられる。

以上より、各金属を総合的に評価した結果を表-3に示す。これより、延性・繰り返し安定性・再結晶能力に優れた錫をエネルギー吸収材料として使用することとし、錫プラグ入り積層ゴムの基本性能試験を行った。

表-5 試験機仕様

項目	仕様
鉛直最大荷重	25MN
鉛直最大ストローク	500mm
水平最大荷重	±6MN
水平最大ストローク	±600mm

表-6 基本条件面圧σ<sub>0</sub>

サイズ	φ 800	φ 900	φ 1000
σ <sub>0</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	10	12.5	15

表-7 圧縮せん断試験基本条件

試験面圧	せん断ひずみ(%)							
	±25	±50	±100	±150	±200	±250	±300	±400
0.5σ <sub>0</sub>			○					
σ <sub>0</sub>	○	○	○	○	○	○	○	○
2.0σ <sub>0</sub>			○					

表-8 各特性値の評価方法

項目	評価方法
鉛直剛性	試験面圧相当の鉛直荷重を載荷し、荷重振幅±30%を3サイクル加力した時の3回目の履歴特性の最大変位値と最大荷重値の交点とその各最小値の交点を結んだ直線の傾きを算出した。
2次剛性 (せん断弾性率)	試験面圧相当の鉛直荷重を載荷し、試験せん断ひずみの加力を速度5mm/secの三角波で4サイクル行い、3回目の履歴特性の最大加振変位(±δ <sub>max</sub> )の9割の範囲(±0.9δ <sub>max</sub> )の測定値を直線回帰した勾配K <sub>2UP</sub> とK <sub>2LO</sub> の平均値を二次剛性K <sub>2</sub> とした。(図-11参照) せん断弾性率Gは以下の式より算出した。 $G = K_2 \cdot ntr / A_r$
切片荷重 (せん断降伏応力)	試験面圧相当の鉛直荷重を載荷し、試験せん断ひずみの加力を速度5mm/secの三角波で4サイクル行い、3回目の履歴特性の荷重軸切片の上下平均値を切片荷重Q <sub>d</sub> とした。(図-11参照) せん断降伏応力τ <sub>d</sub> は以下の式より算出した。 $\tau_d = Q_d / A_d$

### 3. 実大サイズ試験体の基本性能評価

#### (1) 試験体

試験体仕様を表-4に、構造を図-10に示す。

試験体形状は実用サイズを考慮して、ゴム外径φ800~φ1,000、ゴム総高さ約200mmとした。また錫プラグ径はゴム外径の20%とした。

#### (2) 試験方法と各特性値の評価方法

試験は表-5に示す試験機を用いて行い、所定の軸力を鉛直方向に載荷した状態で水平方向にせん断力を加え、荷重-変形関係を記録することとした。各試験体における基準面圧σ<sub>0</sub>を表-6に示す。

試験は、基準面圧(σ<sub>0</sub>)下においてせん断ひずみ:±25%~±400%を与える基本試験と、面圧依存性を確認するため試験面圧を0.5σ<sub>0</sub>および2.0σ<sub>0</sub>として100%のせん断ひずみを与える面圧依存性確認試験とした。試験

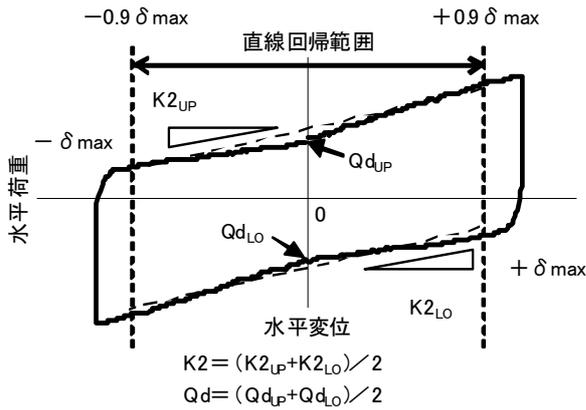


図-11 2次剛性および切片荷重の算出方法

表-9 基本性能試験結果

項目	φ 800-1	φ 800-2	φ 800-3	φ 900-1	φ 900-2	φ 1000-1
鉛直剛性 ( $\times 10^3$ kN/m)	3,691	3,550	3,412	4,295	4,447	5,329
二次剛性 ( $\times 10^3$ kN/m)	1.00	1.01	1.02	1.21	1.32	1.52
せん断弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )	0.410	0.416	0.418	0.390	0.426	0.408
切片荷重 (kN)	167	194	185	288	308	388
降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	8.3	9.7	9.2	11.3	12.1	12.3

条件を表-7 に示す。

評価項目は、鉛直剛性・2次剛性・切片荷重とした。

各特性値の評価方法を表-8 に示す。

なお、圧縮せん断試験時の水平荷重～水平変位関係(履歴特性)は変位 0mm 付近の荷重が低下する形状を示している(図-11 参照)。そこで、2次剛性は正負荷重各々について±0.9δmax 部分の曲線部分を直線回帰し、その値の平均値とした。また切片荷重は実測された履歴特性の、正負切片荷重値の絶対値の平均とした。

(3) 試験結果

基本性能試験結果を表-9に示す。またφ900-1試験体の試験実施時の履歴特性を図-12および図-13に示す。

せん断弾性率は約0.4N/mm<sup>2</sup>、せん断降伏応力は10.5 N/mm<sup>2</sup>±20%程度であった。

面圧σ<sub>0</sub>での2次剛性と切片荷重のせん断ひずみ依存性を図-14および図-15に示す。各測定値はせん断ひずみ±100%における測定値で基準化している。

2次剛性はせん断ひずみの増加とともに低下する傾向を示し、その変化率の基準値はφ800で、せん断ひずみ=[50%/100%]において1.22以下、[200%/100%]において0.79以上となっている。また、切片荷重の変化率の基準値は、φ800で、せん断ひずみ=[50%/100%]において0.90以上、[200%/100%]において1.13以下となっている。

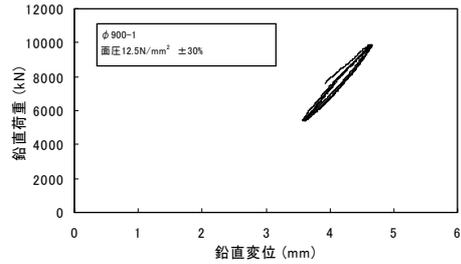


図-12 圧縮試験時履歴特性

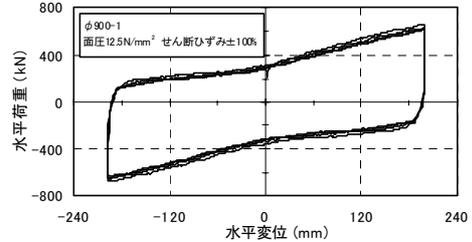


図-13 圧縮せん断試験時履歴特性

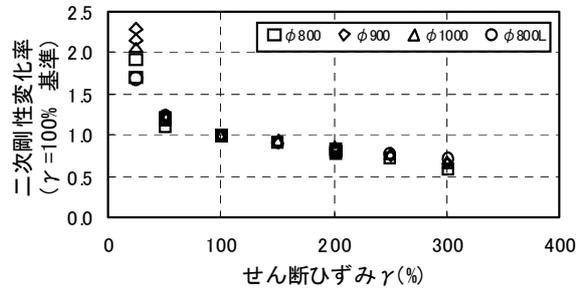


図-14 2次剛性のせん断ひずみ依存性

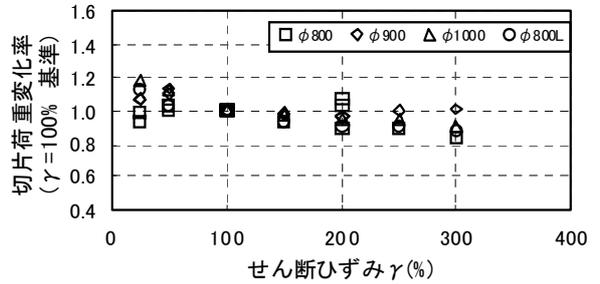


図-15 切片荷重のせん断ひずみ依存性

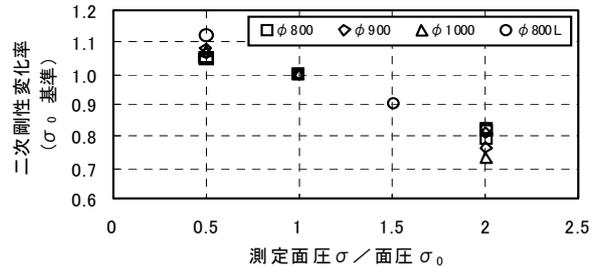


図-16 2次剛性の面圧依存性

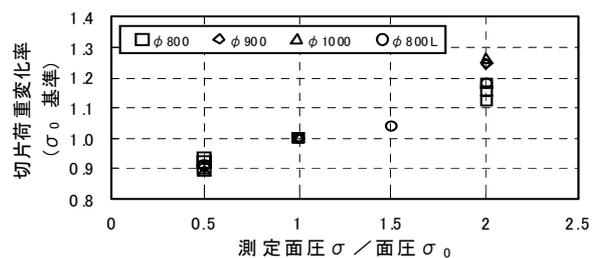


図-17 切片荷重の面圧依存性

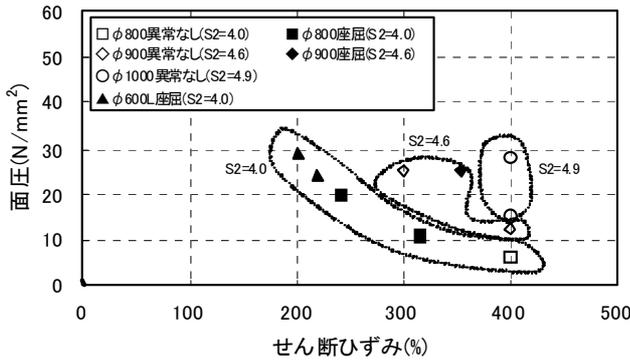


図-18 座屈限界性能

表-10 比較用鉛プラグ入り積層ゴム仕様

名称	φ 600L	φ 800L	φ 900L
ゴム材料	天然ゴム G=0.39N/mm <sup>2</sup>		
プラグ材料	鉛		
ゴム外径D(mm)	600	800	900
プラグ径d(mm)	120	160	180
ゴム1層厚さtr(mm)	4.5	6.0	6.8
ゴム層数n	33	33	29
ゴム総高さntr(mm)	148.5	198.0	197.2
ゴム部受圧面積A <sub>g</sub> (mm <sup>2</sup> )	271,434	482,549	610,726
プラグ断面積A <sub>d</sub> (mm <sup>2</sup> )	11,310	20,106	25,447
1次形状係数S <sub>1</sub>	32.0	32.0	31.8
2次形状係数S <sub>2</sub>	4.0	4.0	4.6

表-11 試験体諸元

試験体	総高さ	mm	174.5
	有効面積	mm <sup>2</sup>	70686
積層ゴム	直径	mm	300
	全高	mm	130.5
	有効高さ	mm	98.5
	ゴム層	mm	2.25
		層数	
	せん断弾性率	N/mm <sup>2</sup>	0.4
錫プラグ	直径	mm	30
	有効面積	mm <sup>2</sup>	707
フランジ PL	直径	mm	520
	厚さ	mm	26

同様にせん断ひずみ±100%における2次剛性と切片荷重の面圧依存性を図-16および図-17に示す。各測定値は面圧σ<sub>0</sub>での測定値で基準化している。2次剛性は面圧の増加とともに低下するのに対し、切片荷重は面圧の増加とともに上昇する傾向を示し、2次剛性の面圧依存性の基準値はφ800で0.80(面圧比:2)~1.05(面圧比:0.5)程度、切片荷重の面圧依存性の基準値はφ800で0.89(面圧比:0.5)~1.16(面圧比:2)程度である。

各サイズ試験体の座屈性状について面圧とひずみの関係で整理したものを図-18に示す。2次形状係数(S<sub>2</sub>)=4.0の試験体では、低面圧時にはせん断ひずみ=400%でも座屈しないが、面圧が高くなるに従い、せん断ひずみ=200~300%で座屈している。一方、S<sub>2</sub>が最も大きいφ1000試験体では、面圧=28N/mm<sup>2</sup>、せん断ひずみ=400%でも座屈していない。

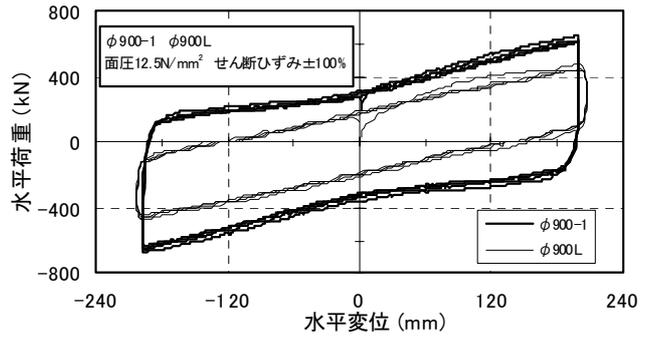


図-19 履歴特性比較

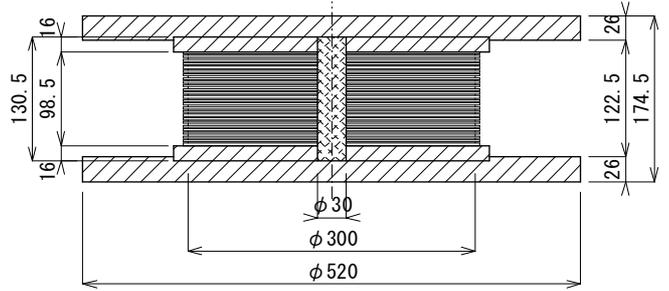


図-20 試験体

(4) 鉛プラグ入り積層ゴムとの比較

今回の試験結果について、表-10に示す鉛プラグ入り積層ゴム試験体との比較を行った。鉛プラグ入り積層ゴムφ600Lは、錫プラグ入り積層ゴムφ800と同一の形状係数を有している。またφ800およびφ900は同サイズの錫プラグ入り積層ゴムと同一形状である。

錫プラグ入り積層ゴムφ900-1と鉛プラグ入り積層ゴムφ900Lの履歴特性の比較を図-19に示す。φ900L試験体の切片荷重が180kNであるのに対し、φ900-1試験体の切片荷重は1.6倍の288kNであった。また、φ900Lの初期降伏荷重が繰り返し加力時切片荷重の5割程度(90kN)であるのに対し、φ900-1の初期降伏荷重は繰り返し加力時切片荷重の約9割(259kN)であった。したがって、錫プラグ入り積層ゴムの初期せん断降伏応力は、鉛プラグ入り積層ゴムの初期せん断降伏応力の約3倍となっている。

鉛プラグ入り積層ゴムφ800Lのひずみ依存性および面圧依存性の比較を図-14~図-17中に示す。錫プラグ入り積層ゴムと鉛プラグ入り積層ゴムの各依存性はいずれも顕著な違いは認められない。また、鉛プラグ入り積層ゴムφ600Lの座屈限界性能を図-18中に示す。座屈の発生についてはほぼ錫プラグ入り積層ゴムと同傾向を示している。

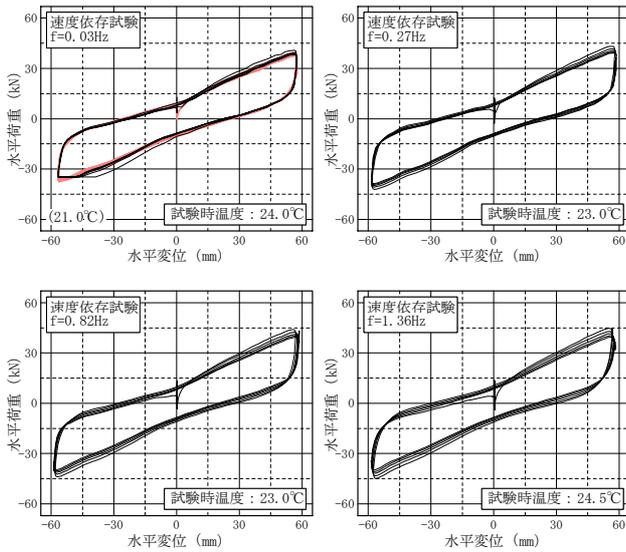


図-21 高速加振試験の履歴履歴ループ

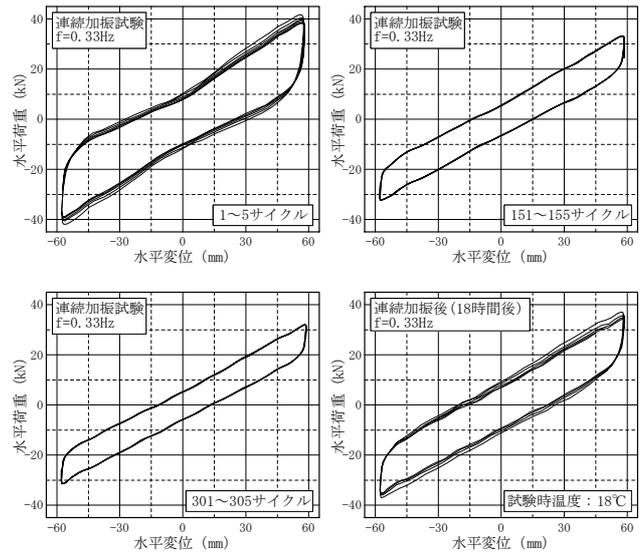


図-23 連続加振試験の履歴履歴ループ

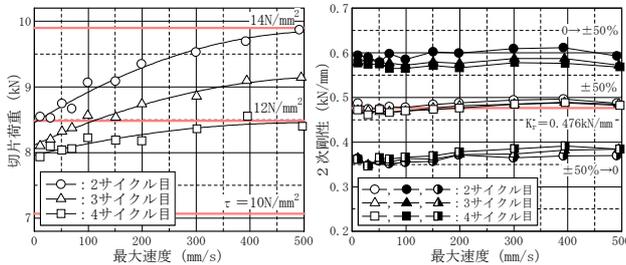


図-22 切片荷重, 2次剛性の特性値の変化

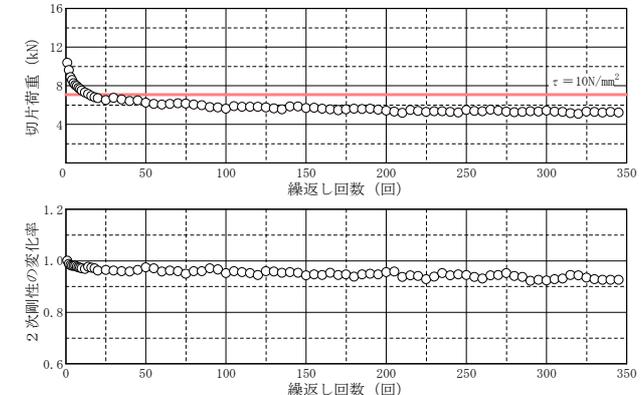


図-24 各サイクル時の切片荷重および2次剛性の変化率

#### 4. 高速加振・連続加振試験

##### (1) 試験体および試験概要

試験体諸元を図-20, 表-11に示す。試験機は鉛直方向3MNジャッキ, 水平方向50kNアクチュエータを使用した。

高速加振試験では, 鉛直荷重 $1,060\text{kN}(15\text{N/mm}^2)$ にて, 加振条件 $0.03\sim 1.36\text{Hz}$ 正弦波,  $\pm 58.5\text{mm}(\gamma=100\%)$ , 加振速度 $11\sim 500\text{mm/sec}$ の各5サイクルの試験を行った。

連続加振試験では, 鉛直荷重 $1,060\text{kN}(15\text{N/mm}^2)$ にて, 加振条件 $0.33\text{Hz}$ 正弦波,  $\pm 58.5\text{mm}(\gamma=100\%)$ , 350サイクルの試験を行った。

高速加振試験, 連続加振試験の順に試験を行っている。

##### (2) 高速加振試験結果

図-21に各速度(加振振動数 $f=0.03, 0.27, 0.82, 1.36\text{Hz}$ )における履歴ループを, 図-22に各速度における切片荷重, 2次剛性の特性値の変化を示す。2次剛性の速度依存性を表すグラフ内で,  $[0\rightarrow\pm 50\%]$ は蝶型の履歴ループのうち変位 $0\text{mm}$ から $\pm 50\%$ までの剛性を表し,  $[\pm 50\%\rightarrow\pm 0]$ は変位が $\pm 50\%$ から $0\text{mm}$ に戻るときの剛性を表している。また,  $[\pm 50\%]$ は変位 $\pm 50\%$ の平均剛性を表してい

る。各々の履歴ループの形状は, 速度の変化に対してほぼ同様な特性を示している。切片荷重は速度の上昇に伴い上昇する傾向にあり, 図-23より,  $V=5\text{mm/s}$ における切片荷重( $Qd_5$ )に対する $V=400\text{mm/s}$ 時の切片荷重( $Qd_{400}$ )の比を求めると,

$$Qd_{400} = 1.235 \times Qd_5 \quad (1)$$

となる。

なお, 2次剛性の速度依存性は認められなかった。

##### (3) 連続加振試験結果

図-23に初期サイクル時, 150サイクル時, 終了時(350サイクル時), 終了後18時間経過時の履歴曲線を示す。

サイクル数が増えるに従い切片荷重が低下し, ループ面積が小さくなる傾向にあるが, 350サイクル終了時においても, 開始時と同様に十分なエネルギー吸収能力を備えた履歴ループを描いた。また, 初期サイクル時でのループ形状は蝶型傾向を示すが, 20サイクルを越えるサイクル回数においてその傾向は小さくなっている。鉛直支持能力も試験開始時と同様に保持しており, 錫プラグの繰り返し加振に対する耐久性が確認できた。

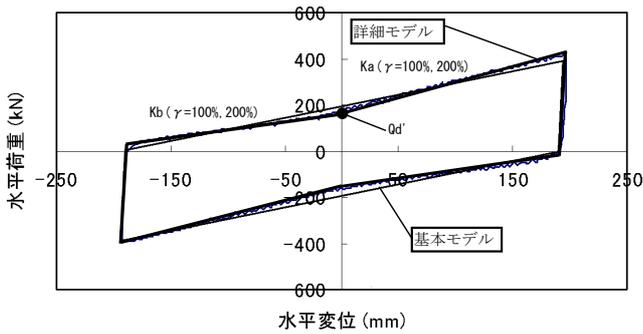


図-26 履歴ループと詳細モデル

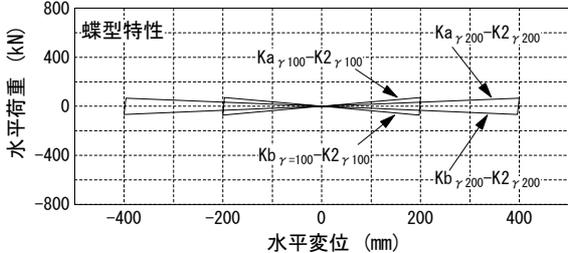
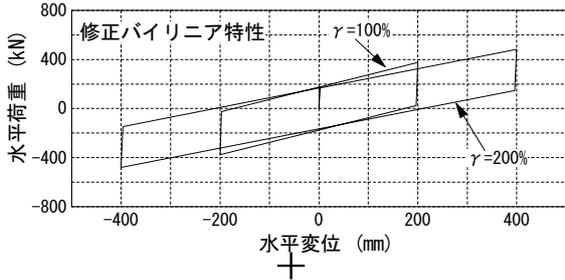


図-26 修正バイリニア特性と蝶型復元力特性

試験終了後18時間後の再試験では、連続試験開始時と同様な履歴ループを描いている。また、切片荷重については、試験開始時の切片荷重以下ではあるが、350サイクル終了時の切片荷重と比較して大きくなっている。これは、錫プラグが時間の経過とともに再結晶したためと考えられる。

図-24に各サイクル時の切片荷重、2次剛性の変化率を示す。切片荷重は、試験開始後20サイクルまで低下傾向が顕著に現れており、その後終了時の350サイクルまでの低下傾向は緩やかである。2次剛性については、サイクル数による変化は小さかった。

## 5. 復元力特性のモデル化

### (1) 蝶型復元力のモデル化

図-25に、800φ試験体の試験履歴ループとバイリニアに設定した基本モデル、および蝶型の復元力に設定した詳細モデルを示す。

基本モデルについては、ゴムのせん断弾性係数率に基づいた2次剛性とループ面積を等値と設定した切片荷重によるバイリニア特性で表現している。

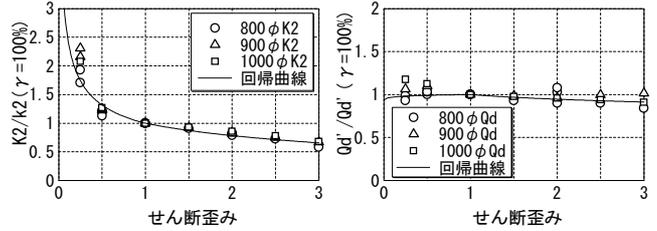


図-27 2次剛性と切片荷重ひずみ依存性

表-12 蝶型復元力の特性値

	γ = 100%	γ = 200%
K2	各基準値	修正バイリニア式
K1	各基準値	—
Qd	各基準値	—
Ka	1.49・K2	0.99・K2
Kb	0.73・K2	0.63・K2
Qd'	0.82・Qd	修正バイリニア式

蝶型復元力については、図-26に示すように、修正バイリニア特性と蝶型部分の剛性(Ka, Kb)との並列バネで表現している。

修正バイリニア特性については、試験における各ひずみ時の2次剛性、切片荷重からひずみ依存式を設定した。図-14, 15に示した2次剛性と切片荷重のひずみ依存特性をもとに作成した各ひずみ時の特性値の回帰式を以下に示す。また、回帰結果を図-28に示す。

2次剛性

$$\gamma < 1.0$$

$$K2(\gamma) = (0.997 \times \gamma^{-0.403}) K2(\gamma_{100}) \quad (2)$$

$$\gamma \geq 1.0$$

$$K2(\gamma) = (1.0 + (-0.313) \ln(\gamma)) K2(\gamma_{100}) \quad (3)$$

切片荷重

$$\gamma < 1.0$$

$$Qd'(\gamma) = (1.0 + 0.013 \ln(\gamma)) Qd'(\gamma_{100}) \quad (4)$$

$$\gamma \geq 1.0$$

$$Qd'(\gamma) = (1.0 + (-0.079) \ln(\gamma)) Qd'(\gamma_{100}) \quad (5)$$

蝶型部分の剛性については、せん断ひずみγ=100%時と200%時の蝶型部分の剛性で代表している。蝶型部分の剛性は、ひずみが大きくなると小さくなり、ひずみが大きいと蝶型が目立たなくなる傾向にある。γ=100%と200%で規定しているため、設定したせん断ひずみと免震建物の最大せん断ひずみを確認して、最適なKa, Kbを与えることとする。

表-12に蝶型復元力の特性値を示す。

図-28に試験ループと蝶型+修正バイリニア履歴特性を示す。各ひずみ時の試験ループと蝶型復元力の対応が良好に示されている。

### (2) 応答比較

実免震建物の諸元を用いて、基本モデルと詳細モデル

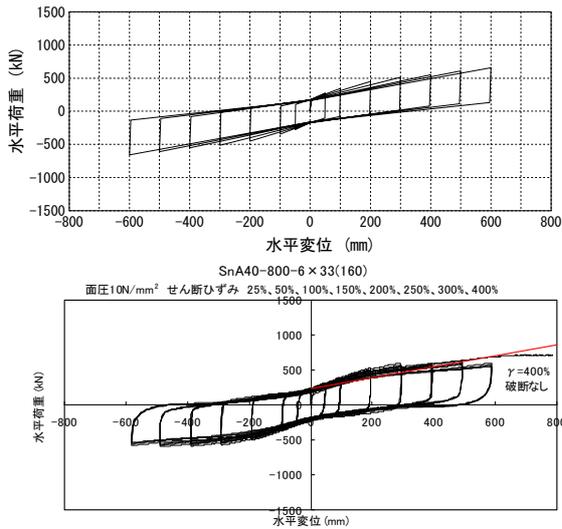


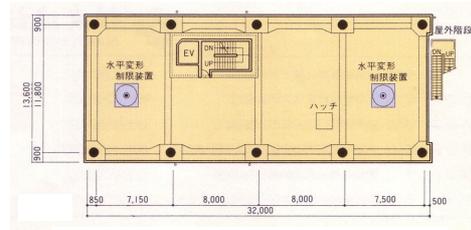
図-28 試験ループと蝶型+修正バイリニア履歴特性

による応答比較を行った。検討に用いた建物は地上7階建てのRC造事務所ビルであり、延べ床面積は3,142m<sup>2</sup>、軒高は24.6mである。上部の建物重量は、 $\Sigma W=37,093\text{kN}$ 、免震装置の平均面圧は7.6N/mm<sup>2</sup>である。図-29に免震層平面図、建物諸元を、図-30に応答結果を示す。図-30には、基本モデルと詳細モデルについて、最大応答加速度、変位、層せん断力係数、免震層の履歴ループを示した。既往波と模擬波の地表面最大速度Vmax=75cm/sの入力で、そのときの最大歪みは約200%である。基本モデルと詳細モデルの応答は、ほとんど同一で両者のモデル化の違いは数%であり、免震クリアランスの余裕分、設計用せん断力の余裕分に納まる範囲と考えられる。γ=100%時の応答比較についても両者は良い対応を示した。

## 6. まとめ

鉛プラグに替わるエネルギー吸収材料として錫を使用した積層ゴム免震装置を開発し、その基本性能を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 錫は延性・繰り返し履歴・常温再結晶性のいずれにおいても鉛と同等あるいはそれ以上の特性を持ち、エネルギー吸収材料として使用可能である。
- ② 錫プラグ入り積層ゴムの2次剛性および切片荷重のひずみ・面圧依存性は、いずれも鉛プラグ入り積層ゴムと同程度である。
- ③ 錫プラグ入り積層ゴムの限界性能は、鉛プラグ入り積層ゴムと同程度である。
- ④ 同径の錫プラグを使用した場合、鉛プラグ入り積層ゴムの約1.6倍の切片荷重が得られる。
- ⑤ 錫プラグ入り積層ゴムは、高速度加振試験・連続加



モデル	層条件	剛性(kN/cm)			耐力(kN)	
		K1	K2	K3	Q1	Q2
RF	重量(kN) 5160 階高(cm) 320	10610	4707	2197	1608	4737
7F	4844	14073	4138	1275	3883	8032
6F	4923	20820	5060	3030	4080	8090
5F	5011	23742	5943	3099	4776	9218
4F	5119	320	36196	13082	3521	12739
3F	5217	320	46935	18760	3824	6051
2F	6914	195	2628	265		2295
M2F	5629					
total	42718	168370	23389	422	19653	54681

図-29 免震装置配置図と建物諸元

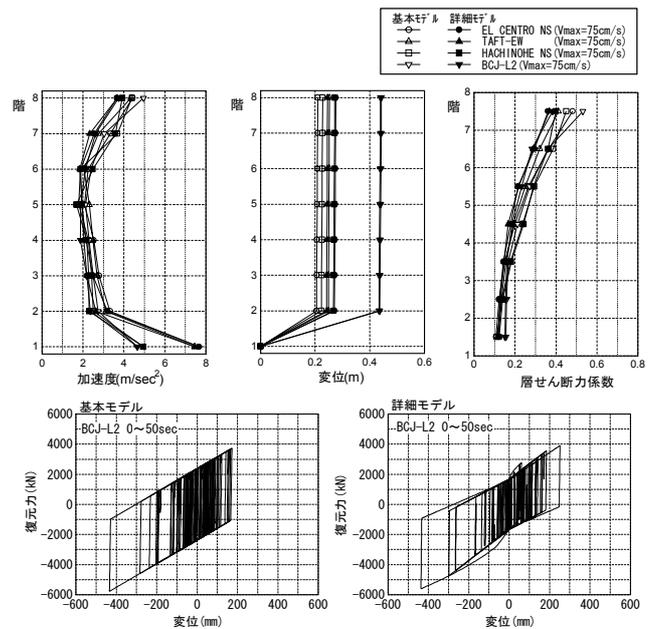


図-30 最大応答値および免震層の履歴ループ

振試験においても良好な性能を発揮する。

- ⑥ 錫プラグ入り積層ゴムの復元力特性は、バイリニアとして評価することができる。

なお、本研究は、(株)免制震デバイス、住友金属鉱山(株)、昭和電線電纜(株)、新日本製鐵(株)による共同研究として実施したものである。

## 参考文献

- 1) 久保 亮五 他編：理化学事典，岩波書店，1964
- 2) 木原諄二 他編：金属の百科事典，丸善，1999