

錫プラグ入り積層ゴムアイソレータの健全性について

Soundness of Rubber Bearing with Tin Plug

開発美雪
Miyuki KAIHOTSU

柳 勝幸
Masayuki YANAGI

齊木健司*1
Kenji SAIKI

鈴木良二*1
Ryoji SUZUKI

安永 亮*2
Akira YASUNAGA

古橋 剛*3
Takeshi FURUHASHI

2011年東北地方太平洋沖地震時による免震建物の被害調査を行ったところ、一部の鉛ダンパーで亀裂等の損傷が確認された。これは中小地震や強風時などの微小変形の累積も一因であると報告されている。そこで本報では錫プラグ入り積層ゴム試験体に微小繰返し加振および大変形繰返し加振実験を実施し、耐久性能の確認を行った。その結果、錫プラグ入り積層ゴムは繰返し変形に対して耐久性を有していることを確認した。

In surveys on the damage of buildings caused by the 2011 Tohoku-Pacific Ocean earthquake, it was reported that damages such as cracks were detected in some of lead dampers used in seismically isolated buildings. After investigations of the damaged dampers in detail, it was confirmed that these cracks were generated by accumulation of small-amplitude loading of small earthquakes or strong winds. From this background, fatigue characteristics of the rubber bearing with tin plug (SnRB) under repeated small-amplitude were evaluated by cyclic loading tests of models. In conclusion, the durability of the SnRB under repeated shear loading of small amplitude was verified by the test results.

1. はじめに

錫プラグ入り積層ゴムアイソレータ（以下 SnRB）は積層ゴム部中央に錫プラグが挿入されており、地震時に積層ゴムの水平変形により錫プラグが塑性変形することによって、地震エネルギーを吸収し地震による建築物の揺れを抑える働きをする。錫は鉛とほぼ同等の性質を持つ金属であるが、切片荷重が鉛の1.7倍と高く、エネルギー吸収力が高いことが特徴である。また、環境に優しい材質として様々な工業製品に使用されている。

一般社団法人日本免震構造協会の調査によると、2011年東北地方太平洋沖地震による免震建築物の躯体への被害は少なく、免震効果が確認された。その一方で免震部材が多数回の地震を受け、一部のエネルギー吸収部材では亀裂等の損傷が確認されており、中小地震や強風時などの微小変形の累積も一因であると報告されている¹⁾。SnRBもエネルギー吸収部材であることから、同様な現象が生じていないか懸念されている。

そこで本報では、2項にて SnRB の微小振幅繰返し加振試験の影響の検討、3項にて既往実験に基づく繰返し変形

の影響の検討、4項にて鉛ダンパーの亀裂発生時・破断時の限界曲線との比較を行い、繰返し変形を受けた SnRB の健全性に関する検証結果を報告する。

2. 微小振幅繰返し加振試験

2.1 試験体の形状

微小振幅繰返し加振試験の試験体は SnRB1000（ゴム外径 $\phi 1000$ mm、錫プラグ径 $\phi 200$ mm）を想定実機とし、1/2にスケールダウンさせた SnRB500（ゴム外径 $\phi 500$ mm、錫プラグ径 $\phi 100$ mm）とした。試験体諸元を表1に示す。

試験時には熱電対を用いて錫プラグ頂部、錫プラグ中央部および雰囲気温度の計測を行った。図1に熱電対挿入箇所を示す。

表1 試験体諸元

項目	想定実機 SnRB1000	縮小試験体 SnRB500
せん断弾性率 G (N/mm ²)	0.39	0.39
ゴム外径 D (mm)	$\phi 1000$	$\phi 500$
錫プラグ径 d (mm)	$\phi 200$	$\phi 100$
ゴム層構成 tr (mm) × n (層)	7.5 × 26	3.75 × 26
S ₁ (*4) / S ₂ (*5)	32.0 / 5.1	32.0 / 5.1

$$*4: S_1 = \frac{D^2 - d^2}{4 \times t_r \times D}$$

$$*5: S_2 = \frac{D}{n \times t_r}$$

*1 株式会社 免制震デバイス

*2 住友金属鉱山シボレックス株式会社

*3 日本大学

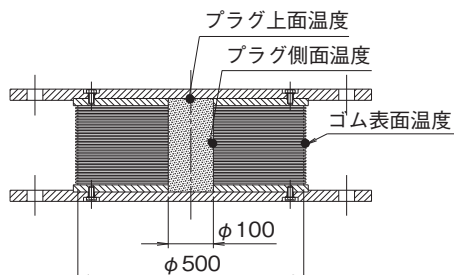


図1 温度測定箇所

2.2 試験条件

試験における加振条件を表2に示す。加振条件は既往の研究^{2), 3)}を参考とし、鉛ダンパー亀裂発生時・破断時の繰返し回数と振幅の関係より、振幅 ± 2 mmにおける40万回以上の繰返し加振とした。これは想定実機で ± 4 mmの振幅に相当する。微小振幅繰返し加振試験の前後で基本特性試験を行い、特性の変化を確認した。本試験では図2に示すように、同仕様のSnRB試験体2基(試験体No.1, No.2)を2段に取付け、ボルト固定した中央の2枚のフランジ端部をアクチュエータにより加力し、鉛直荷重はロードセルを介してジャッキにより载荷した

表2 加振条件

試験番号	せん断ひずみ% (水平変位 mm)	面圧 (N/mm ²)	振動数 (Hz)	サイクル数
1	± 100 (± 97.5)	15	0.0128	4
2	± 2 (± 2.0)	15	1.0	439200 (*6)
3	± 100 (± 97.5)	15	0.0128	4

* 6: 9回断続的に実施

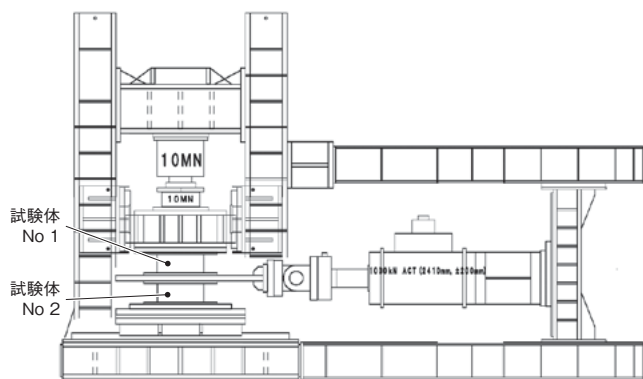


図2 試験機概要

2.3 試験結果

図3に微小振幅繰返し加振試験時の錫プラグの温度変化、図4に水平荷重-水平変位関係(履歴曲線)の一例を示す。繰返し加振試験中の錫プラグ近傍の温度上昇は、錫プラグ上面温度が5℃程度、錫プラグ側面温度が7℃程度で一定となり、履歴曲線の形状が安定していることを確認した。

図5は微小振幅繰返し加振試験前後に実施した基本特性試験の水平荷重-水平変位関係の比較を示す。表3には基本特性の特性値の比較を示す。微小振幅繰返し加振試験前後の基本特性試験において履歴曲線に大きな変化は見られない。また、切片荷重の変化も+1.8%とわずかであった。

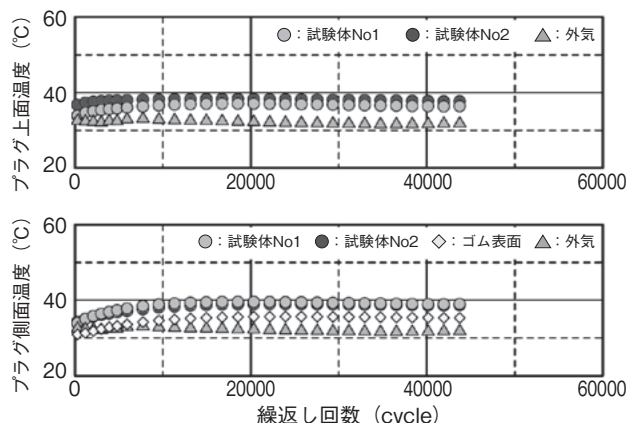


図3 熱電対の時刻歴(代表例)

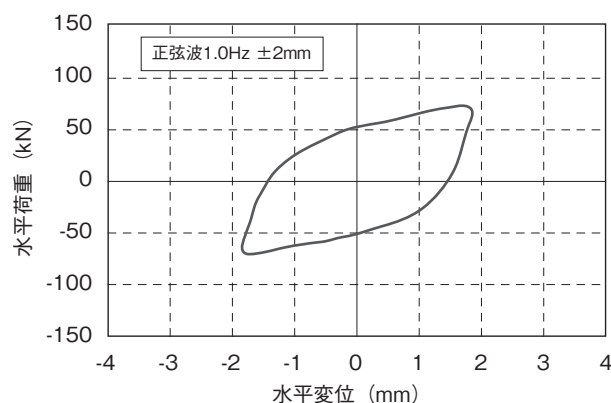


図4 微小振幅繰返し加振試験時の水平荷重-水平変位関係(代表例)

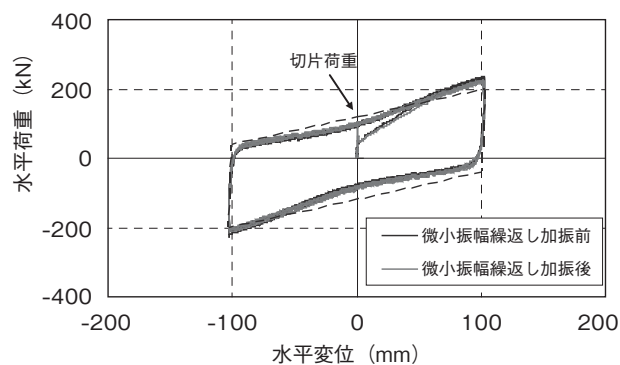


図5 微小振幅繰返し加振試験前後の水平荷重-水平変位関係(試験体No2)

表3 基本特性の比較

	微小振幅繰返し試験前	微小振幅繰返し試験後	変化率
二次剛性 ($\times 10_3$ kN/m)	0.99	0.94	-4.7%
切片荷重*7 (kN)	125	127	+1.8%

* 7: バイリニアモデルの荷重軸切片より算出

3. 既往試験に基づく繰返し加振の影響

3.1 試験体の形状

繰返し変形を受けたSnRBの健全性を確認するためにSnRB試験体に多数回の連続繰返し加振試験を実施した既

往の試験結果を取り上げて、加振内容や加振終了後の履歴特性の整理・分析を行った。

既往の研究にて SnRB の連続繰返し加振の評価を行った試験体を表 4 に示す。ゴム種は全て G0.39 N/mm² である。

3.2 試験条件

各試験体の試験条件を表 5 に示す。表 5 には、想定実機である SnRB1000 に換算した変位も合わせて示す。加振方法は全て一定振幅加振である。

3.3 試験結果

連続繰返し加振時の水平荷重－水平変位関係を図 6 に示す。各試験体とも繰返し回数が増すにつれて錫プラグの温度上昇の影響により切片荷重が低下する傾向を示した。しかし、履歴曲線の形状は試験終了時まで乱れることはなく、鉛直荷重支持能力を保持していることが確認できる。

図 7 に連続繰返し加振の実施前後に行った基本性能試験結果より得られた水平荷重－水平変位関係を示す。SnRB500, SnRB700, SnRB800 については実施前後での基本性能に変化は認められなかった。しかし、SnRB1200 についてはせん断ひずみ $\gamma = \pm 300\%$ の大変形の繰返しのため、他の試験体よりも切片荷重の低下が見られたが、1 日後には切片荷重が繰返し加振前に比べて約 83% まで回復していることを確認した。

表 4 試験体諸元 (既往試験)

項目	想定実機 SnRB1000	SnRB500	SnRB700	SnRB800	SnRB1200
ゴム外径 (mm)	$\phi 1000$	$\phi 500$	$\phi 700$	$\phi 800$	$\phi 1200$
錫プラグ径 (mm)	$\phi 200$	$\phi 100$	$\phi 140$	$\phi 160$	$\phi 240$
ゴム総厚 (mm)	7.5×26 =195.0	3.75×26 =97.5	5.3×26 =137.8	6.0×26 =156.0	9.0×22 =198.0
1 次形状係数 S_1	32.0	32.0	31.7	32.0	32.0
2 次形状係数 S_2	5.1	5.1	5.1	5.1	6.1

表 5 加振条件 (既往試験)

項目	SnRB500	SnRB700	SnRB800	SnRB1200
ゴム外径 (mm)	$\phi 500$	$\phi 700$	$\phi 800$	$\phi 1200$
面圧 (N/mm ²) (荷重 kN)	15 (2827)	15 (5542)	15 (7238)	15 (16286)
試験速度 (mm/s)	12.6	173	5	5
せん断ひずみ (%) (水平変位 mm)	± 2 (± 2)	± 100 (± 137)	± 250 (± 390)	± 300 (± 594)
$\phi 1000$ 換算変位 (mm)	± 4	± 195	± 488	± 585
繰返し回数	439200	100	50	20

4. 鉛ダンパーの限界曲線との比較

鉛ダンパーに関して、亀裂発生時・破断時の繰返し回数と振幅の関係が安永・高山²⁾らによって報告されている。SnRB の長周期地震動に対する健全性を考察するため、表 6 に示す SnRB 各試験体が受けた累積変位量を示す。図 8 にこれらの結果と鉛ダンパーの亀裂発生時・破断時の限界曲線との比較を示す。図 8 の縦軸の片振幅は想定実機である SnRB1000 に換算した値となっている。

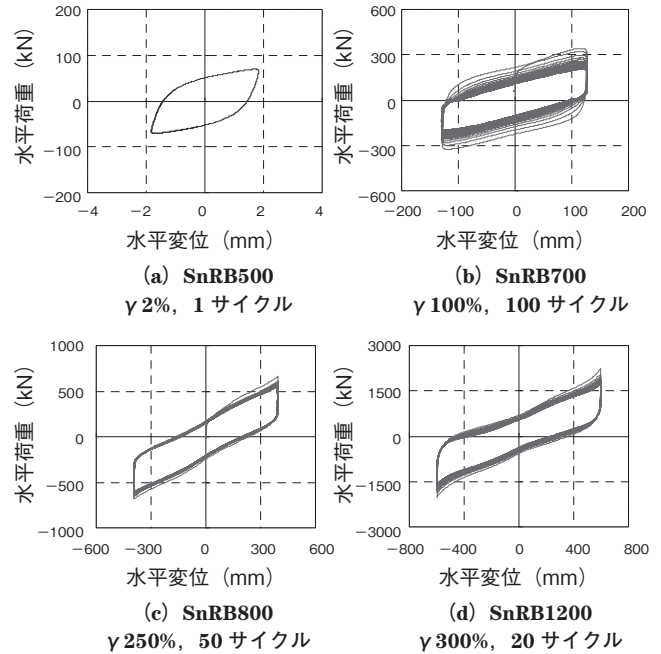


図 6 連続繰返し加振時の水平荷重－水平変位関係

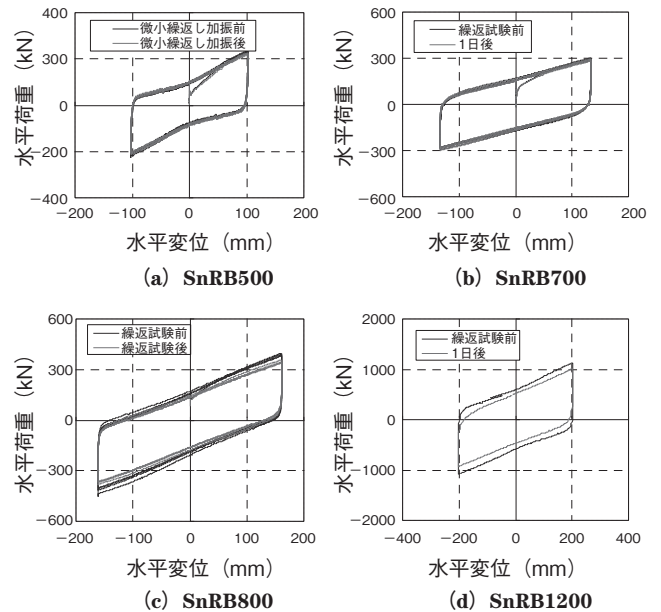


図 7 連続繰返し加振前後の水平荷重－水平変位関係

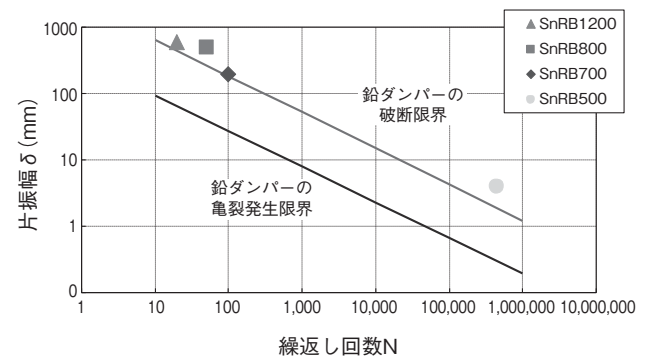


図 8 錫プラグ入り積層ゴムが受けた加振履歴の等価振幅と繰返し回数 (鉛ダンパーとの対比)

図8より全 SnRB 試験体はそれぞれの変位振幅において、鉛ダンパーの破断繰返し回数あるいはそれを上回る加振を受けたことがわかる。しかし、いずれの試験体も鉛ダンパーの破断限界以上の耐久性を有していることが確認された。

SnRB500 と SnBR800 については試験終了後に試験体を切断し内部損傷の有無を確かめた。図9に切断写真を示す。各試験体ともプラグの断面に亀裂等の損傷は見られなかった。

ム免震装置の開発（その17）繰返し変形を受けた錫プラグ入り積層ゴムの健全性」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, p.725-726 (2013)

表6 各試験体が受けた累積履歴量

項目	SnRB500	SnRB700	SnRB800	SnRB1200
ゴム外径 (mm)	φ500	φ700	φ800	φ1200
累積水平変位 (m)	3513	59	263	63
繰返し回数 (回)	439200	100	50	20
振幅 (%)	2	100	250	300
換算振幅 / 破断限界	2.1	1.1	1.8	1.3

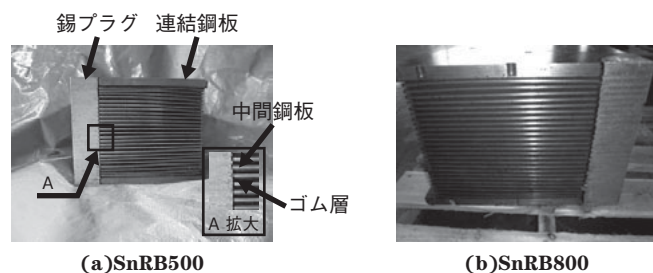


図9 試験終了後のプラグ断面

5. ま と め

本報では連続繰返し加振を受けた SnRB の健全性を検証した。その結果、切片荷重が低下するものの鉛直支持機能および復元ばね機能を十分保持している結果となった。

また、連続繰返し加振終了後に試験体を切断し、錫プラグの状態を確認したが、亀裂等の損傷は見られなかった。

以上より、SnRB は連続繰返し加振に対して、亀裂発生や力学的特性変化が生じにくいことが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 応答制御建築物調査委員会報告書, (一社)日本免震構造協会 (2012)
- 2) 安永, 高山, 森田, 安藤: 「鉛ダンパーの風応答に関する研究 (その2) 微小変位での高サイクル疲労特性」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, p.289-290 (2010)
- 3) 宮崎, 河内山, 長弘, 竹中, 北村: 「繰返し変形を受けた鉛プラグ入り積層ゴムの健全性 (その2) 鉛プラグ入り積層ゴムの疲労特性試験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, p.391-392 (2012)
- 4) 齊木, 田中, 鈴木, 柳, 開発, 古橋: 「錫プラグ入り積層ゴム免震装置の開発 (その15) 微小振幅連続加振試験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, p.721-722 (2013)
- 5) 須藤, 古橋, 田中, 齊木, 鈴木, 柳, 開発: 「錫プラグ入り積層ゴ

昭和電線デバイステクノロジー(株)
開発 美雪 (かいほつ みゆき)
免制震制音ユニット 技術課
免震部材の開発および設計に従事

昭和電線デバイステクノロジー(株)
柳 勝幸 (やなぎ まさゆき)
免制震制音ユニット 技術課 主査
免震部材の開発および設計に従事

株式会社 免制震デバイス
齊木 健司 (さいき けんじ)
営業統括部 設計部長

株式会社 免制震デバイス
鈴木 良二 (すずき りょうじ)
技術統括部 技術センター

住友金属鉱山シボレックス株式会社
安永 亮 (やすなが あきら)
技術部

日本大学
古橋 剛 (ふるはし たけし)
博士 (工学)
理工学部建築学科 教授