

厚肉積層ゴムを用いた免震・除振システムの開発（その1）

——厚肉積層ゴムの特性試験——

中村 嶽 岡田 宏 関 松太郎
杉山 公一 寺村 彰 内田 壱
(本社 原子力本部設計部)

Development of Base Isolation System for Earthquakes and Micro-vibrations Using Laminated Thick Rubber Bearings (Part 1)

——Characteristics Tests for Laminated Thick Rubber Bearings——

Takashi Nakamura Hiroshi Okada Matsutaro Seki
Kouichi Sugiyama Akira Teramura Hiraku Uchida

Abstract

This report describes characteristics tests of laminated thick natural rubber bearings for isolation of earthquake vibrations and micro-vibrations caused by traffic. This type of laminated rubber bearing has thick rubber layers so that vertical-direction stiffness is low and designing is done aiming for natural frequency in the vertical direction to be about 5 Hz, whereas that of an ordinary laminated rubber bearing is about 15 Hz.

Two test models of laminated thick natural rubber bearings are adopted in the characteristics tests; one is to support 35 ton for a multi-purpose acoustics laboratory and the other to support 200 ton. The main parameters in the characteristics tests are axial load, amplitude of deformation, and vibration frequency to examine characteristics in the region from micro-vibrations to large deformations of laminated thick rubber bearings.

Heating deterioration acceleration in periods corresponding to 100 years of scale models of laminated thick rubber bearings is performed to examine the alteration of characteristics such as creep and vertical and horizontal stiffnesses of scale models at intervals of corresponding to 20 years.

概 要

交通振動の除振と免震を目的とした天然ゴム系厚肉タイプ積層ゴム（厚肉積層ゴム）の力学的特性試験に関して報告する。厚肉積層ゴムは、通常の積層ゴムに比べて一層あたりのゴム厚が大きく、鉛直方向の剛性が低くなっており、通常の積層ゴムの鉛直方向の固有振動数が15 Hz前後にあるのに対し、厚肉積層ゴムのそれは5 Hz程度を目標に設計されている。本報では、多目的音響実験棟用の35 t用厚肉積層ゴムと200 t用厚肉積層ゴムについて軸力、加振振幅および振動数をパラメータとした特性試験を行ない、厚肉積層ゴムの微小振動から大変形までの特性を調べた。また、厚肉積層ゴムの経年による特性変化を調べるため、厚肉積層ゴムの縮小モデルによる一定期間毎の加熱劣化促進と特性試験を行なった。加熱劣化促進は経年100年相当まで行ない、経年20年毎に軸方向変形の測定、圧縮試験および圧縮せん断試験を行なって、厚肉積層ゴムのクリープ量および鉛直・水平剛性の変化を調べた。

1. はじめに

交通振動などの除振を目的とする免震建物は、水平方向と同時に鉛直方向の振動低減を行なうことに主眼をおかれることが多い。ここでは、交通振動の除振と免震への適用を想定した天然ゴム系厚肉タイプ積層ゴム（以下厚肉積層ゴムと呼ぶ）について、静的および動的実験によって調べた力学的特性と、加熱劣化促進試験によって調べた厚肉積層ゴムの経年による特性変化に関して報告する。

2. 厚肉積層ゴムの力学的特性試験

厚肉積層ゴムは、通常の積層ゴムに比べて一層あたりの

ゴム厚を大きくして、鉛直方向の剛性を低めており、通常の積層ゴムの鉛直方向の固有振動数が15 Hz前後にあるのに対し、厚肉積層ゴムのそれは5 Hz程度を目標に設計されている。表-1に天然ゴム系の厚肉積層ゴムの基本配合を、表-2にゴム素材の基本特性を示す。

試験体は、鉛直方向の固有振動数が5 Hz程度で、設計軸力35 tの厚肉積層ゴム（水平方向周期約2.0秒）と設計軸力200 tの厚肉積層ゴム（水平方向周期約2.5秒）の2種類を用いている。

免震用積層ゴムの設計仕様は、通常地震を対象に設定されて、大変形レベルの静的な水平せん断試験と鉛直方向の

圧縮試験によって性能確認がなされている。今回、厚肉積層ゴムの力学特性試験においては、35t用厚肉積層ゴムの水平および鉛直方向の静的と動的の詳細な加力実験を行ない、200t用厚肉積層ゴムの実験結果と合わせて、厚肉積層ゴムの除振の微小振動レベルから免震の大変形レベルまでの剛性および等価粘性減衰定数の振動数依存性、軸力依存性、振幅依存性、水平変位依存性などを調べた。表-3に実験内容を示す。

2.1 35t用厚肉積層ゴム

2.1.1 試験体 図-1に、35t用厚肉積層ゴム(大林組技術研究所の多目的音響実験棟用)の仕様を示す。

2.1.2 実験装置と実験方法 図-2に、35t用厚肉積層ゴムの加力装置を示す。試験体は、上下二つの加力ボックスに固定される。上部加力ボックスは、上下方向にのみ滑るよう設計されており、この加力ボックスを介して鉛直方向ジャッキにより軸力(一定軸力または変動軸力)を加える。一方、下部ボックスは、水平方向ジャッキにより水平一方向のみ滑動する。35t用厚肉積層ゴムの実験パラメータは、水平方向は鉛直軸力 P_0 (0~70t) と加振振動数 f_0 (静的~1.0 Hz) および水平変位振幅で、鉛直方向は鉛直軸力 P_0 (0~70t) と変動軸力 ΔP ($\pm 2 \sim \pm 17.5$ t), 加振振動数 f_0 (静的~10 Hz) およびオフセット水平変位 δ_0 (0~20 cm) などである。実験における主な測定項目は、水平変位、水平荷重、鉛直変位および鉛直荷重であり、動的試験においては水平および鉛直加速度を測定して、治具の慣性力による荷重の補正を行なっている。以下に測定機器を示す。

表-1 ゴム基本配合

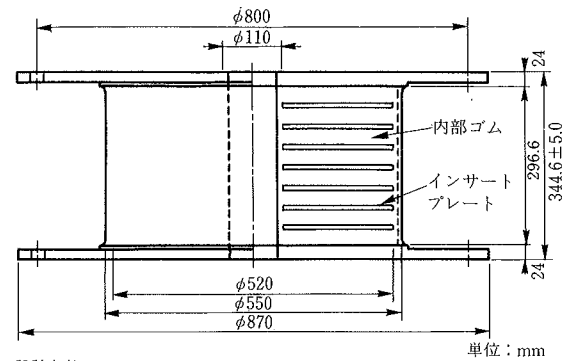
成分	重量(%)
天然ゴム	68
カーボンブラック	18
加硫剤	2
その他 {加硫促進剤 老化防止剤等}	12

表-2 ゴム基本物性

硬度 (JIS A)	25%応力 (kg/cm ²)	破断伸び (JIS K) (%)
40±5	3.4±1	>500
引張強さ (kg/cm ²)	せん断係数 G(kg/cm ²)	ヤング係数 E(kg/cm ²)
>200	5.6	11.5

表-3 実験内容 (○印:実施)

		35t用厚肉積層ゴム	200t用厚肉積層ゴム
水平方向 実験	静的	○	○
	動的	○	—
鉛直方向 実験	静的	○	○
	動的	○	○



設計条件
 設計荷重: 35t
 水平ばね定数: 376kg/cm ± 20% ゴム: 32.0mm × 8層 = 256.0mm
 鉛直ばね定数: 31.6t/cm ± 20% 鉄板: 5.8mm × 7層 = 40.6mm
 設計許容変位: 20cm 形状率: 3.20 面圧: 17.3kg/cm²

図-1 35t用厚肉積層ゴム

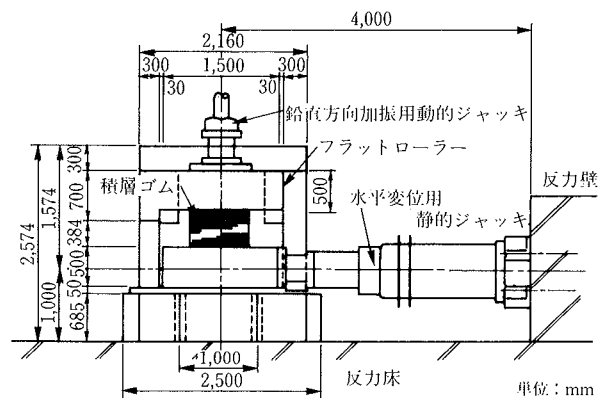
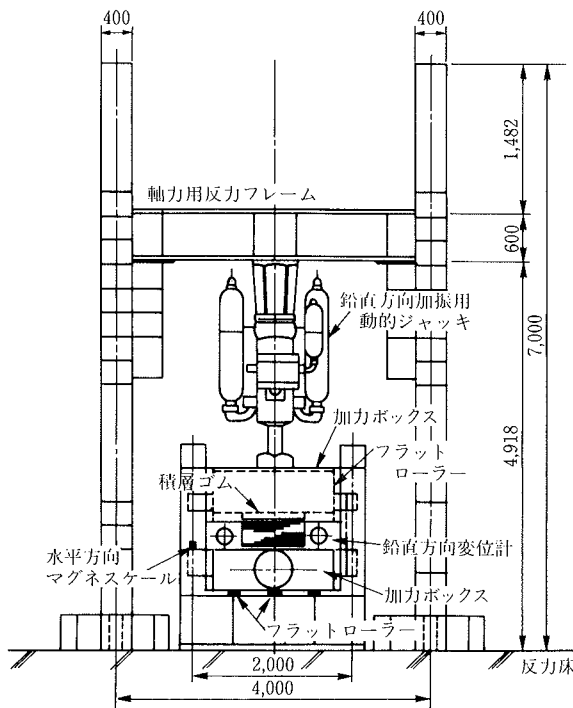


図-2 加力装置

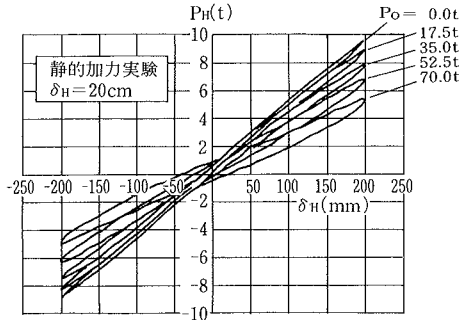


図-3.1 水平方向復元力特性 (静的: 35 t用ゴム)

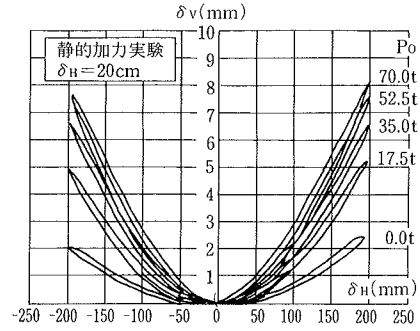


図-3.2 鉛直方向沈み込み量 (静的: 35 t用ゴム)

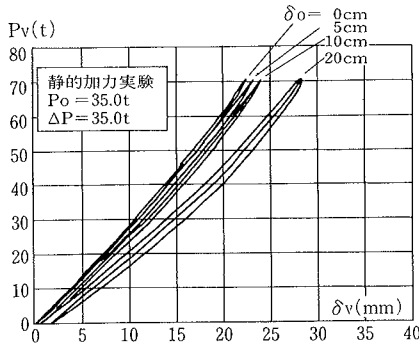


図-4 鉛直方向復元力特性 (静的: 35 t用ゴム)

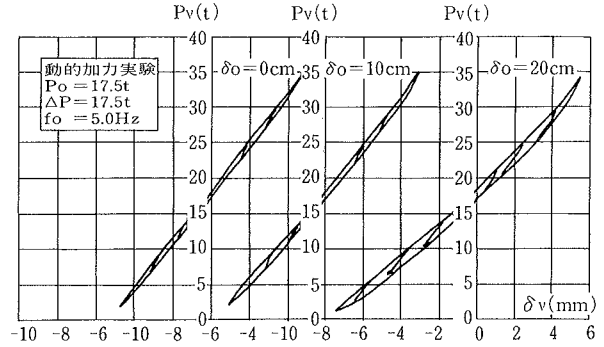


図-6 鉛直方向復元力特性 (動的: 35 t用ゴム)

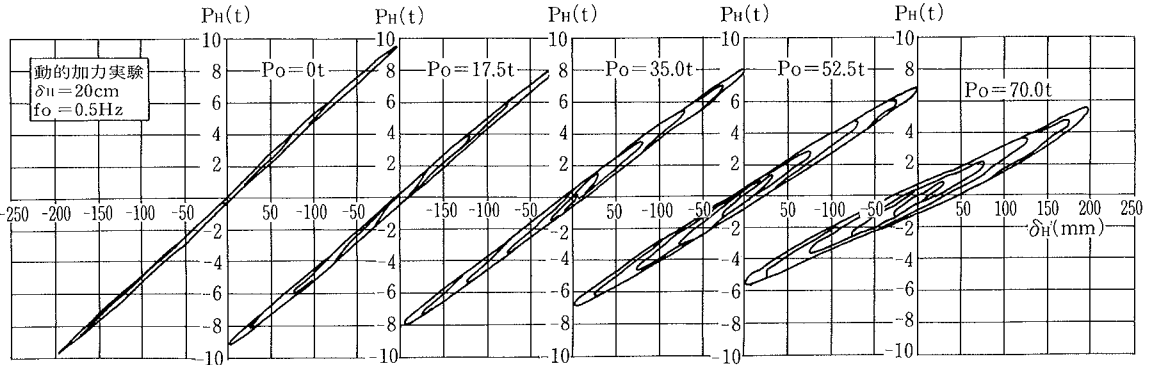


図-5 水平方向復元力特性 (動的: 35 t用ゴム)

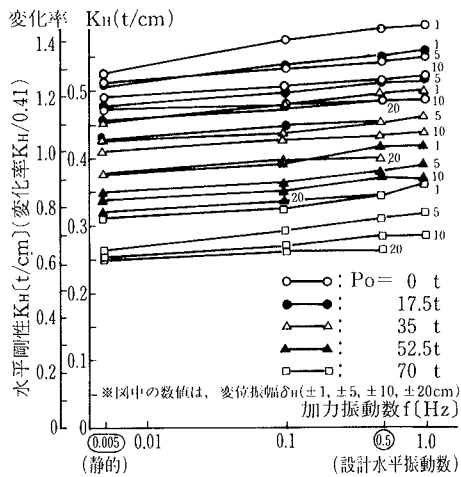


図-7 水平剛性 K_H の振動数依存性 (動的: 35 t用ゴム)

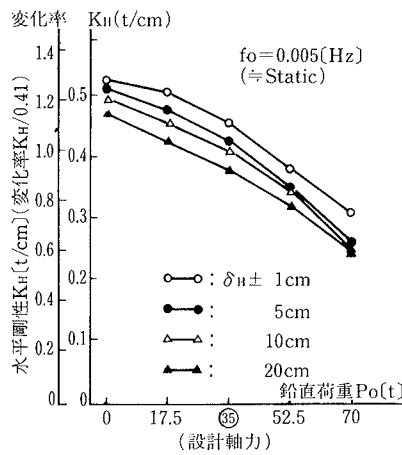


図-8 水平剛性 K_H の変位振幅依存性 (動的: 35 t用ゴム)

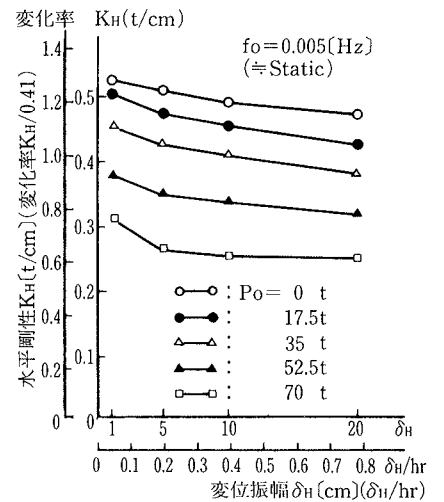
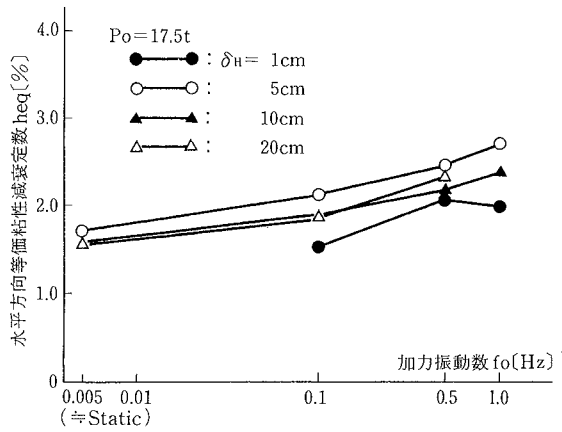


図-9 水平剛性 K_H の鉛直荷重依存性 (動的: 35 t用ゴム)



図一10 水平方向等価粘性減衰定数 (動的: 35 t 用ゴム)

- ・水平変位: マグネスケール
- ・水平荷重: 水平方向ジャッキ内蔵ロードセル
- ・鉛直変位: 差動トランス型変位計
- ・鉛直荷重: 鉛直方向ジャッキ内蔵ロードセル

実験データは、A/D変換器を通してミニコンピュータ(MV-4000)に取り込んで解析処理を行なっている。

2.1.3 実験結果 35 t用厚肉積層ゴムの静的実験結果の例として、水平方向の復元力特性を図一3.1, そのときの鉛直方向の沈み込みを図一3.2に、鉛直方向の復元力特性を図一4に示す。図一3.2の沈み込みは、各軸力で水平変位零のときを原点にしている。また、動的実験結果の例として、水平方向の復元力特性を図一5に、鉛直方向の復元力特性を図一6に示す。

(1) 水平方向の力学的特性 図一3.1の設計軸力: $P_0=35\text{ t}$, 水平変位 $\pm 10\text{ cm}$ (せん断ひずみ=水平変位/ゴム部の総厚: 40%)時の割線剛性(静的): 0.41 t/cm (設計: 0.38 t/cm)を水平基準剛性とする。

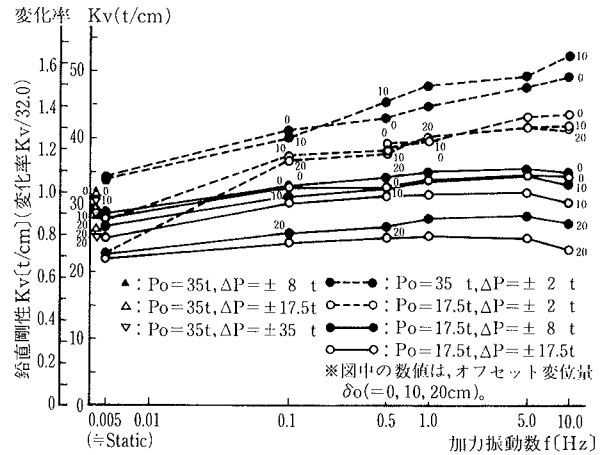
図一7に示す軸力および水平変位振幅をパラメータとした水平剛性 K_H の振動数依存性は、基準値に対する全データのばらつきが0.6~1.45倍の範囲にある。同一軸力, 同一変位振幅下では振動数の増加(静的~1.0 Hz)に対して10%前後で変位振幅や軸力の影響に比べて小さい。

図一8に示す K_H の変位振幅依存性は、水平変位 δ_h が大きくなると K_H は減少する。各軸力において、 δ_h が0~20 cm(せん断ひずみ: 0~78%)に変化すると K_H は20%程度減少する。

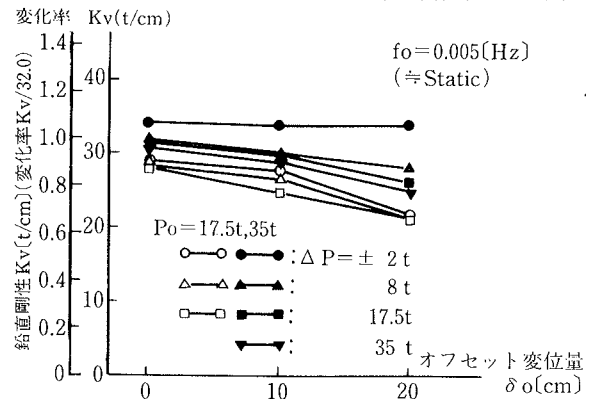
図一9に示す K_H の鉛直荷重依存性は、軸力 P_0 が大きくなるに従って K_H は減少する。設計軸力(35 t)における $\pm 35\text{ t}$ の変動軸力に対し、 K_H は約 $\pm 30\%$ 変動する。図一10に示す水平方向の等価粘性減衰定数 h_{eq} は1.5~2.5%である。

(2) 鉛直方向の力学的特性 図一4のオフセット水平変位 $\delta_0=0\text{ cm}$, $P_0=35\text{ t}$, $\Delta p=8\text{ t}$ (設計軸力の23%)時の割線剛性(静的) 32 t/cm (設計: 31.6 t/cm)を鉛直基準剛性とする。

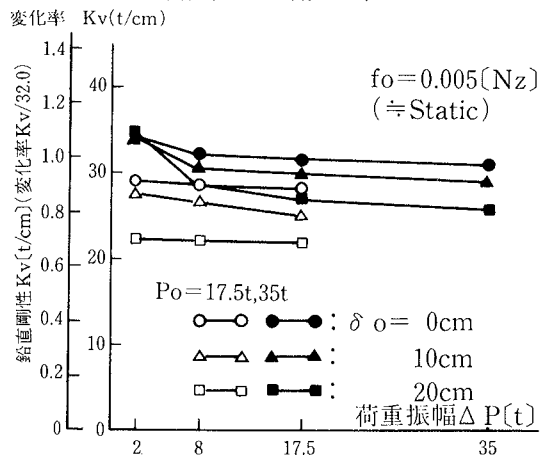
図一11に示す鉛直剛性 K_V の振動数依存性に関する全データのばらつきは0.7~1.60の範囲にある。ここで、設計軸力 $P_0=35\text{ t}$, 設計鉛直固有振動数 $f_0=5\text{ Hz}$, 微小変動軸力



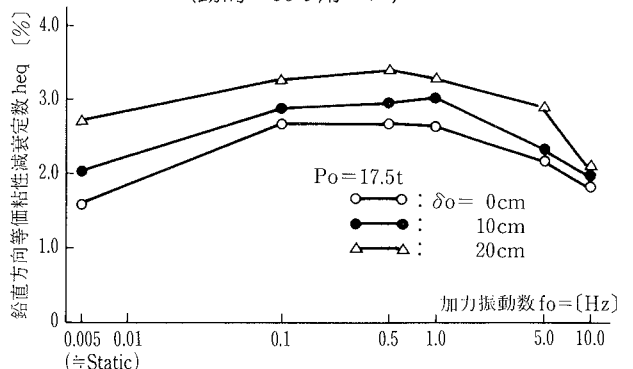
図一11 鉛直剛性 K_V の振動数依存性 (動的: 35 t 用ゴム)



図一12 鉛直剛性 K_V のオフセット変位依存性 (動的: 35 t 用ゴム)



図一13 鉛直剛性 K_V の荷重振幅依存性 (動的: 35 t 用ゴム)



図一14 鉛直方向等価粘性減衰定数 (動的: 35 t 用ゴム)

$\Delta p = \pm 2t$ の場合では、動的鉛直剛性は $f_0 = 0.005$ Hz の準静的鉛直剛性の約40%増となっている。

図-12に示す K_v のオフセット変位依存性は、設計軸力 35 t の $\Delta p = \pm 2t$ のときのみ一定で、全体的にオフセット変位の増加にともない K_v の減少傾向がある。

図-13に示す K_v の荷重振幅依存性では、 Δp が小さくなると K_v は増大傾向がある。

図-14に示す鉛直方向の等価粘性減衰定数 h_{eq} は、加力振動数にあまり影響をうけず 2~3% の値となっている。

2.2 200 t用厚肉積層ゴム

2.2.1 試験体 図-15に、200 t用の厚肉積層ゴムの仕様を示す。

2.2.2 実験装置と実験方法 200 t用厚肉積層ゴムは加力装置の制約上、水平方向の静的加力実験(楯ブリヂストンの800 t用試験機使用)と鉛直方向の静的加力実験(大林組技術研究所の300 t用アムスラー使用)および鉛直方向の動的加力実験(住友金属工業株式会社の250 t用アクチュエータ使用)を行なった。

200 t用厚肉積層ゴムの水平方向の静的加力実験は、800 t用試験機により、鉛直軸力 P_0 (0 t, 100 t, 200 t, 400 t) および水平変位 (± 10 cm, ± 20 cm, ± 30 cm, ± 40 cm) をパラメータとして行なっている。また、鉛直方向の静的加力実験は、300 t用アムスラーにより、設計軸力 $P_0 = 200$ t を与えて、変動軸力 ($\Delta P_v = \pm 60$ t, ± 30 t, ± 15 t, ± 8 t, ± 4 t, ± 2 t) を加力した。

200 t用厚肉積層ゴムの鉛直方向の動的加力実験は、250 t用アクチュエータにより、試験体に設計軸力 $P_0 = 200$ t を与えてから、変位制御で振幅 ($\Delta \delta_v = \pm 0.4$ mm, 0.2 mm, 0.1 mm, 0.05 mm) と振動数 ($f_v = 0.005, 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 7.5, 10.0$ Hz) をパラメータとした正弦波加振を行なっている。

2.2.3 実験結果 200 t用厚肉積層ゴムの静的実験の水平方向の復元力特性を図-16.1, そのときの鉛直方向の沈み込みを図-16.2に、鉛直方向の復元力特性を図-17に示す。なお、図-16.2の沈み込みの原点は軸力零で水平変位零のときとしている。

(1) 水平方向の力学的特性 図-16.1の軸力と水平変位をパラメータにした200 t用厚肉積層ゴムの水平方向の復元力特性は、設計変位 ± 40 cm (せん断ひずみ: 112%) まではほぼ線形となっており、水平剛性の水平変位の依存性は小さい。また軸力が大きくなるにつれて水平剛性は小さくなる。なお、同図における軸力 $P_0 = 200$ t 時の水平変位 $\delta_H = \pm 20$ cm (せん断ひずみ: 56%) での水平剛性: $K_H = 1.39$ t/cm (設計: 1.35 t/cm) を以下、200 t用厚肉積層ゴムの水平基準剛性としている。

図-18に、軸力と水平変位をパラメータにした200 t用厚肉積層ゴムの水平剛性 K_H を示す。同図において、 K_H は軸力が大きくなると小さくなり、軸力による依存性が見られるが、同一軸力では水平変位振幅による K_H の変化は小さい。

図-19に、軸力と水平変位をパラメータにした200 t用

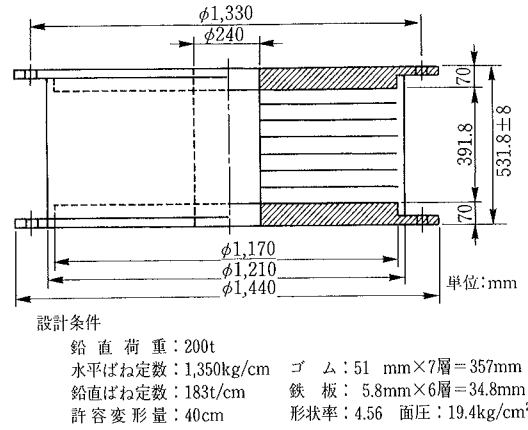


図-15 200 t用厚肉積層ゴム

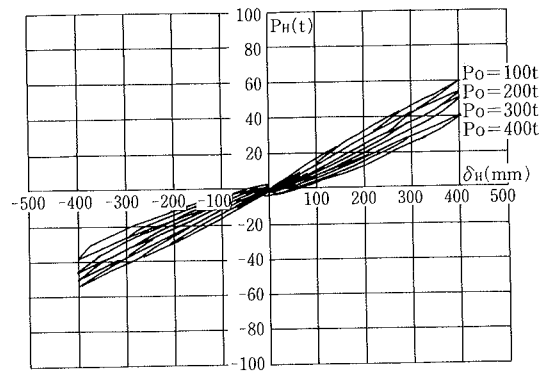


図-16.1 水平方向復元力特性 (静的: 200 t用ゴム)

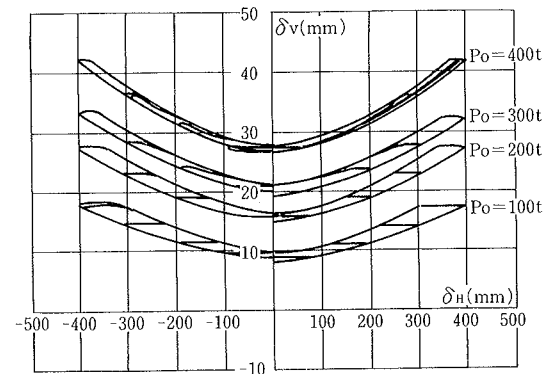


図-16.2 鉛直方向沈み込み量 (静的: 200 t用ゴム)

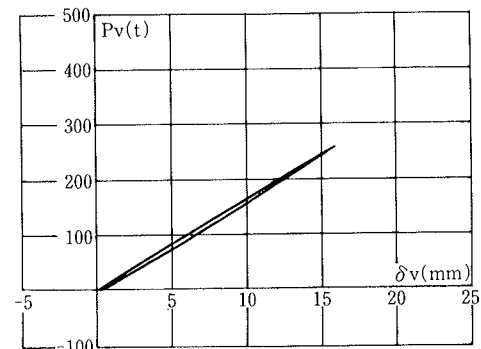


図-17 鉛直方向復元力特性
(軸力 200 t+軸力変動 静的: 200 t用ゴム)

厚肉積層ゴムの水平方向の等価粘性減衰定数 h_{eq} を示す。同図において、軸力が 400 t の場合は h_{eq} は 4 % 程度と大きい、軸力が 100~300 t では h_{eq} は 2 % 程度である。また軸力が 100~300 t では水平変位振幅による h_{eq} の変化は小さい。

(2) 鉛直方向の力学的特性

① 静的実験 図-17に、鉛直方向加力実験より求めた 200 t 用厚肉積層ゴムの鉛直方向の復元力特性を示す。鉛直方向の荷重-変形曲線はほぼ線形で、同図の $P_V=200$ t ± 60 t 間での割線剛性より求めた静的鉛直剛性 k_V は 169 t/cm (設計: 183 t/cm) である。同図に、設計軸力 $P_0=200$ t 時で、変動軸力 $\Delta P_V = \pm 60$ t, ± 30 t, ± 15 t, ± 8 t, ± 4 t, ± 2 t を 2 回繰り返して加力したときの鉛直方向の荷重-変形曲線を重ねて表示する。

各軸力変動時の荷重-変形曲線は、全てほぼ同一線上に乗っており、静的実験の変動軸力による鉛直剛性の変化は小さい。なお軸力が 200 t で変動軸力 $\Delta P_V = \pm 60$ t のときの等価粘性減衰定数 h_{eq} は 2 % 程度で、水平方向の h_{eq} とほぼ等しい。

② 動的実験 図-20に 200 t 用厚肉積層ゴムの鉛直剛性の振動数および荷重振幅依存性を示す。250 t 用アクチュエータによる静的試験で求めた鉛直剛性 k_{VS} は 162 t/cm で、これを静的鉛直基準剛性とする。動的試験による動的鉛直剛性 k_{VD} は k_{VS} より高く、加振振動数 5 Hz 以上では、加振振幅レベルが小さいほど k_{VD} は高くなっている。設計鉛直固有振動数 $f_0=5$ Hz, 振幅 $\Delta\delta = \pm 0.05$ mm 時の k_{VD} は 212 t/cm で、 k_{VS} に比べて約 31% 剛性が高くなっている。

図-21に 200 t 用厚肉積層ゴムの等価粘性減衰定数 h_{eq} の振動数および荷重振幅依存性を示す。 h_{eq} は 1~2 % 程度となっており、5.0 Hz 以上の高い振動数では、復元力が乱れるため、 h_{eq} は求めていない。

2.3 力学特性試験の考察

厚肉積層ゴムの力学特性試験結果を以下にまとめる。

① 軸力および水平変位振幅をパラメータとした動的鉛直剛性は、基準の静的鉛直剛性に比べて 0.6~1.45 倍の範囲で変化している。

② 軸力および変動軸力または鉛直変位振幅をパラメータとした動的鉛直剛性は、基準の静的鉛直剛性に比べて 0.7~1.60 の範囲で変化しているが、設計軸力下での固有振動数 $f_0=5$ Hz での動的鉛直剛性は、静的鉛直剛性の約 30~40% 増となる。

③ 動的鉛直剛性の固有振動数 $f_0=5$ Hz での荷重振幅依存性では、変動軸力または鉛直変位振幅が小さいほど、動的鉛直剛性が高くなる。

④ 等価粘性減衰定数 h_{eq} は 1~2 % 程度で、静的試験と動的試験の違いは見られない。

3. 厚肉積層ゴムの耐久試験

天然ゴム系厚肉積層ゴムの経年による特性変化を調べるため、縮小モデルによる一定期間毎の加熱劣化促進と特性

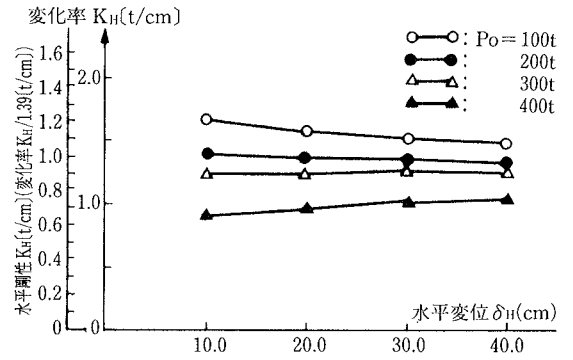


図-18 水平剛性 K_H (静的: 200 t 用ゴム)

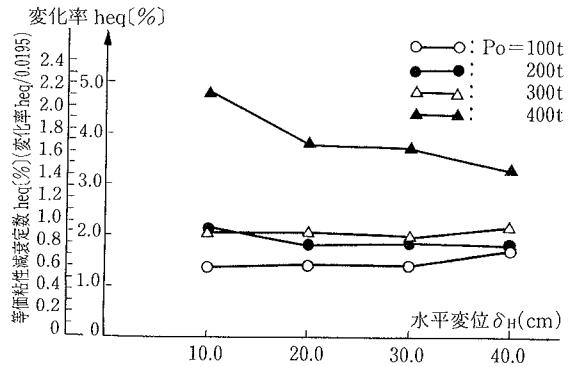


図-19 水平方向等価粘性減衰定数 (静的: 200 t 用ゴム)

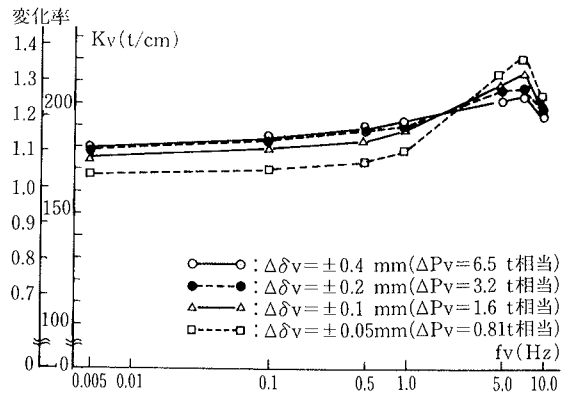


図-20 鉛直剛性 K_V の振動数依存性 (動的: 200 t 用ゴム)

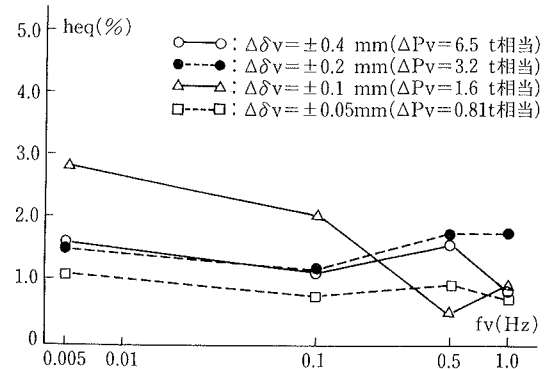


図-21 鉛直方向等価粘性減衰定数 (動的: 200 t 用ゴム)

試験を行なった。加熱劣化促進は剛性に関する経年100年相当まで行ない、経年20年毎に縮小モデルの軸方向変形の測定と、圧縮試験および圧縮せん断試験を行なって、厚肉積層ゴムのクリープ量および鉛直と水平剛性の変化を調べた。

3.1 試験体

図-22に厚肉積層ゴムの形状係数と面圧を合わせた縮小モデルの加熱劣化促進試験体の仕様を示す。

3.2 試験方法

試験体2体を、加熱劣化促進試験装置の恒温槽(100°C)内に直列に入れ、ゴムの温度が100°Cになった後に5tの軸力をかけ、一定期間(6日間)恒温槽内にて加熱劣化促進を行ない、定期的に試験体を取り出して、軸方向変形を測定し、軸力10t载荷の圧縮試験により鉛直剛性を、また軸力5tで加振振動数0.2Hz、水平変位±5cm(せん断ひずみ:81%)の圧縮せん断試験により水平剛性を求めた。

100°Cの促進実験は、剛性に関する活性化エネルギー20.9kcal/molを用いて25°Cに換算すると、1日が3.2年に相当するので、剛性に関する経年20年の加熱劣化促進日数を6日としている。クリープに関する活性化エネルギーは13.1kcal/molとしており、温度100°Cで6日の加熱劣化促進日数は、25°C換算では1.82年に相当する。なお、本耐久試験は(株)ブリヂストンに委託して実施した。

3.3 試験結果の考察

厚肉タイプ積層ゴム試験体の圧縮せん断試験による初期時と加熱劣化促進100年相当経過後の水平変位±3cmと±5cm(せん断ひずみ:49%と81%)の水平方向の復元力特性を図-23に、圧縮試験による鉛直方向の復元力特性を図-24に示す。水平剛性は水平方向の復元力特性の水平変位±5cmの割線剛性とし、鉛直剛性は鉛直方向の復元力特性の設計軸力5t±30%の割線剛性とした。

厚肉タイプ積層ゴム試験体の加熱劣化促進による高さの変化を図-25に、特性試験により求めた水平剛性および鉛直剛性の変化を図-26と図-27に示す。また水平および鉛直方向の等価粘性減衰定数を図-28に示す。

水平剛性および鉛直剛性とも経年によって剛性が大きくなっており、図-26の経年変化60年相当の平均水平剛性は、軸力5t時で約15%初期値より増大している。また図-27の鉛直剛性も初期値より約17%大きくなっている。鉛直剛性は経年変化60年相当で最大を示しており、平均水平剛性は経年変化80年相当で最大(約21%初期値より増大)を示し、それ以降はほぼ同じか、または低下の傾向を示している。

図-28の縮小モデルの等価粘性減衰定数は、鉛直方向は4%程度、水平方向は6%程度と35tおよび200t用厚肉積層ゴムに比べて大きい値となっているが、経年による変化はあまり見られない。

図-29に、図-25の積層ゴムの高さの変化より求めた縮小モデルのクリープ量を示す。これによれば、経年変化約10年相当のクリープ量はゴム部のみの総厚(61.6mm)の約4%になり、厚肉積層ゴムの60年後の予測クリープ量は約14%程度となる。

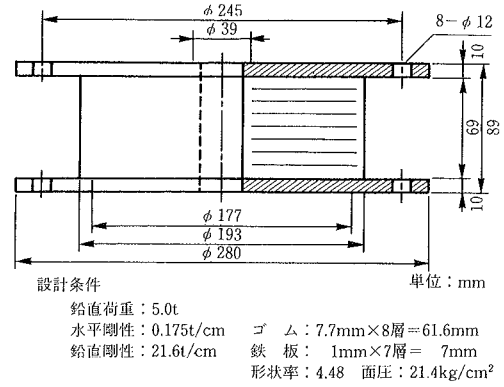


図-22 厚肉積層ゴムの加熱劣化促進用試験体(縮小モデル)

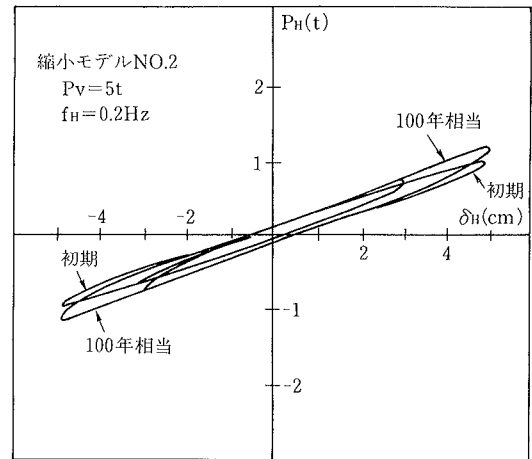


図-23 水平方向復元力特性(動的:縮小モデル)

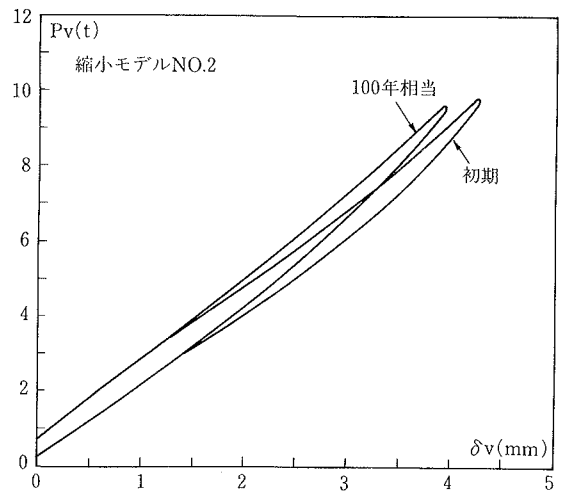


図-24 鉛直方向復元力特性(静的:縮小モデル)

4. まとめ

交通振動の除振と免震への適用を想定した天然ゴム系厚肉積層ゴムの力学的特性を、静的および動的実験によって調べた。その結果、厚肉積層ゴムは従来の薄肉積層ゴムと異なり、加力振動数、変位振幅、軸力などが、水平と鉛直両方向の力学的特性に及ぼす影響が比較的大きくて、動的

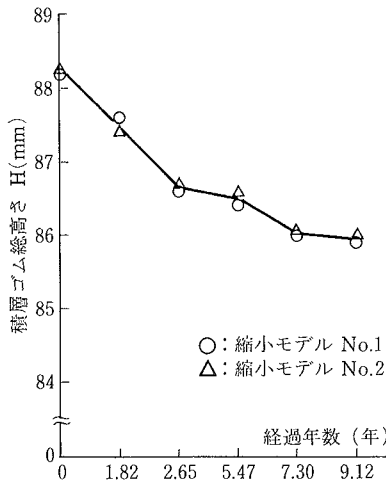


図-25 総高さの経時変化 (縮小モデル)

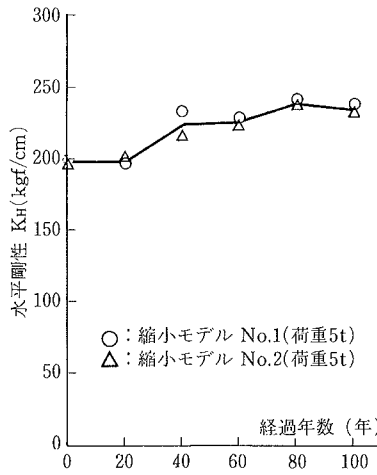


図-26 水平剛性の経時変化 (縮小モデル)

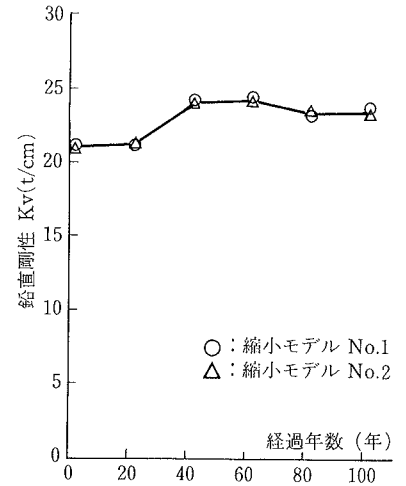


図-27 鉛直剛性の経時変化 (縮小モデル)

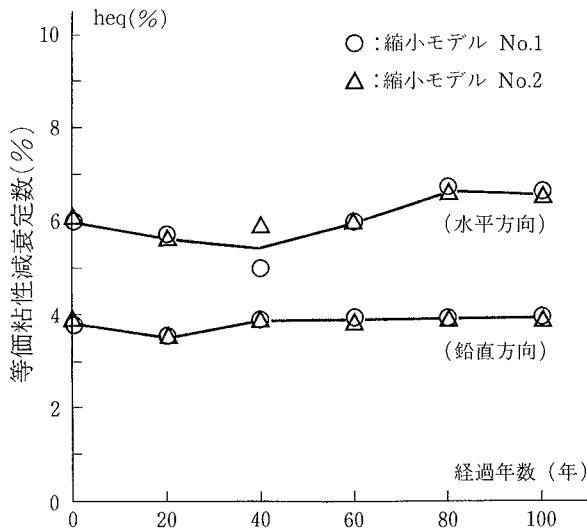


図-28 等価粘性減衰定数の経時変化 (縮小モデル)

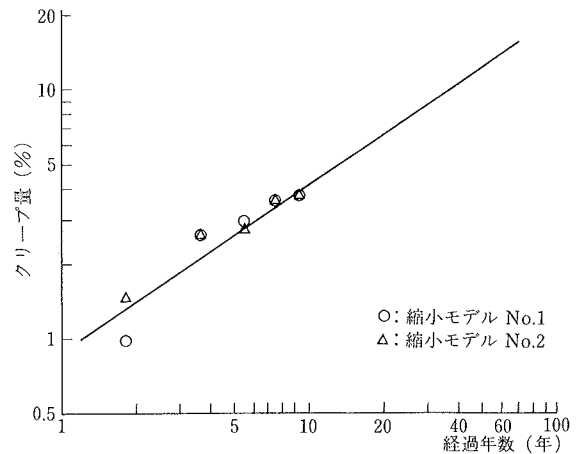


図-29 クリープ量 (縮小モデル)

水平剛性は設計軸力下の静的水平基準剛性の0.6~1.45倍の範囲で変化している。また設計軸力下での厚肉積層ゴムの鉛直方向の固有振動数 $f_0=5$ Hz での動的鉛直剛性は、設計軸力下の静的鉛直基準剛性の約30~40%増になることが確かめられた。等価粘性減衰定数は振動数、荷重振幅、鉛直荷重などによる影響は若干見られるが、水平、鉛直両方向とも従来の天然ゴム系の薄肉積層ゴムと同じ1~2%程度は確保されると考えられる。

加熱劣化促進試験によって調べた厚肉積層ゴムの経年60年相当の特性変化は、水平および鉛直剛性は15~20%程度増大し、クリープ量は約14%と予想される。

交通振動の除振と免震を目的に、天然ゴム系の厚肉積層ゴムを適用する際には、以上の特性を設計に反映する必要がある。

謝 辞

200 t 用厚肉積層ゴムの特性試験および耐久試験においては、(株)ブリヂストン・研究開発本部・開発第4グループ

の芳沢利和氏と笠原康宏氏および住友金属工業株式会社・研究開発本部・建築技術研究室の大竹章夫室長と川口 宏氏の御協力を得ており、ここに感謝する。

参考文献

- 1) 飯塚, 八坂, 他: 建物の免震防振構法の開発 (その2 積層ゴムの静的・動的試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 493~494, (1985. 10)
- 2) 飯塚, 八坂, 他: 建物の免震防振構法の開発 (その3 実大積層ゴムの静的・動的試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 797~798, (1986. 8)
- 3) 武田, 岡田, 他: 高減衰積層ゴムを用いた免震, 微振動・固体伝搬音遮断システムの開発, 大林組技術研究所報, No. 36, p. 103~109, (1988)
- 4) 武田寿一: 構造物の免震防振制振, 技報堂出版, p. 54~55, (1988. 5)
- 5) 内田, 関, 杉山, 岡田: 免震構造に関する研究 (その23 厚肉積層ゴムの特性試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 671~672, (1990. 10)