

# 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

武田 寿一                      岡田                      宏                      内田                      壘  
寺村                      彰                      吉原                      醇                      一                      中村                      充  
平野                      滋                      縄                      岡                      好                      人

## Development of Base Isolation System for Earthquake, Micro-Vibration and Structure-Borne Sound Using Laminated High-Damping Rubber

Toshikazu Takeda                      Hiroshi Okada                      Hiraku Uchida  
Akira Teramura                      Jun-ichi Yoshihara                      Mitsuru Nakamura  
Shigeru Hirano                      Yoshihito Nawaoka

### Abstract

A base isolation system using laminated high-damping rubber was developed aiming for isolation of not only earthquake vibrations, but also micro-vibrations caused by railways and subways. This report describes the results of several tests performed on laminated high-damping rubber and the base-isolated building using this rubber.

The following tests and observations were carried out.

1. Tests to ascertain the characteristics of laminated high-damping rubber pads.
2. Forced vibration tests and traffic tests of the base-isolated building using this high-damping rubber to investigate vibration isolating effects.
3. Forced vibration tests of the base-isolated building in the higher audible frequency range which is related to structure-borne sound.
4. Earthquake observations on the base-isolated building.

It was confirmed through these tests that the isolation system using laminated high-damping rubber is effective against micro-vibrations as well as earthquakes.

### 概 要

免震システムを地震動の周波数領域から、微振動、さらに固体伝搬音の周波数領域まで拡張し、これらの遮断を意図してゴム自身に大きな減衰能力を持たせた高減衰積層ゴムの適用を試みた。この報告はゴム自身の設計値との対応とその特性、大林組技術研究所敷地内の実大構造物にこのゴムを適用し、各種実験を行なった結果の報告である。1章では高減衰積層ゴムの特長と特性、2章では実大構造物において、振動源として起振機とトラック走行による実験結果、3章では伝搬してきた振動が音となって放射される周波数領域についての実験結果を、4章では実大構造物に適用した時の地震観測結果を述べる。

各種実験の結果、免震・防振システムとして有力なシステムであることが裏づけられ、地下鉄や鉄道の近くに建設されるホール、集合住宅、研究施設等、振動や固体伝搬音が問題となる建物への適用を画っていきたい。

#### 1. 高減衰積層ゴムの特性

当社は免震構法として、①標準積層ゴム+鋼棒ダンパー方式、②鉛入り積層ゴム方式、③高減衰積層ゴム方式の3タイプについて種々の実験を実施し、研究・開発を行ってきた。③の高減衰積層ゴム方式は微小変位領域から大変形領域まで安定した減衰性能を有することが特長であり、免震性能の他、主に微小変位領域を対象とす

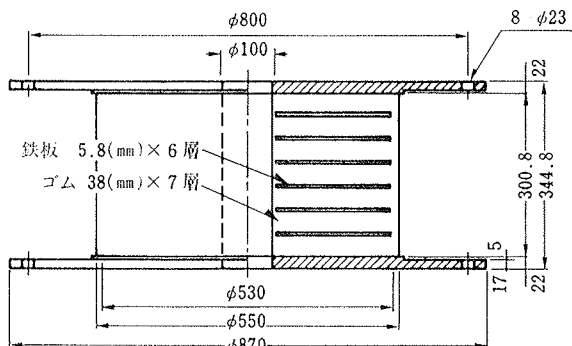
る防振性能（微振動や固体伝搬音の遮断等）に対しても良好な性能を示すものと考えられる。また、付加ダンパーを必要とせず施工法にも優れるため、既存構造物の免震・防振化等、広範囲の適用性が期待されている。

以上の観点から、この報告は高減衰積層ゴムを用いた免震・防振システムの、より高度な可能性を検討したものである。

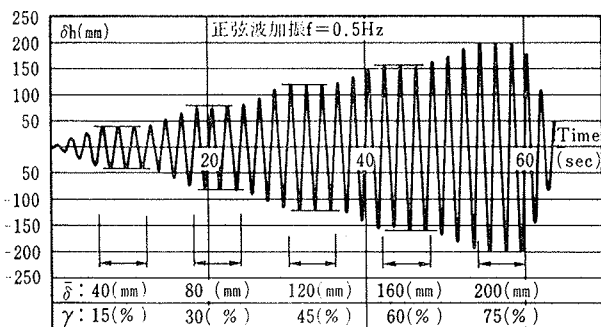
本章では、高減衰積層ゴムの設計し、特性試験により

	硬 度	弾性率 (25% 応力) kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>	破断伸び %
被覆ゴム	60	6.0	140	820
内部ゴム	51	4.7	170	900

表一 使用ゴム材料の基本物性



図一 試験体断面図



図三 水平方向標準加力サイクル

その基本特性を確認した結果について述べる。

### 1.1. 高減衰積層ゴムの設計

水平・上下両方向の免震・防振システムの開発を目標に、以下に示す設計値を設定した。

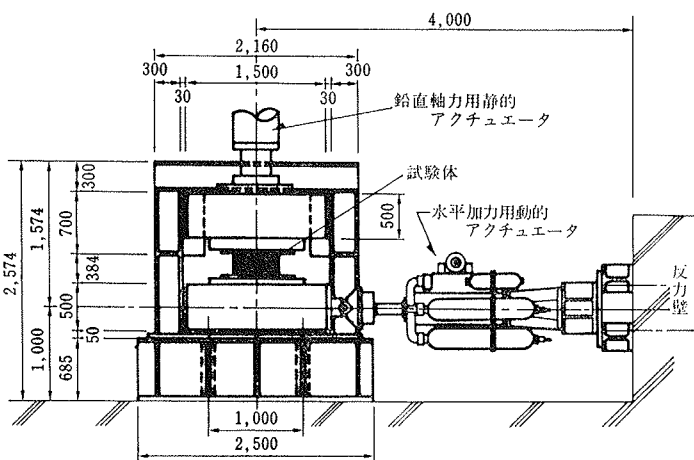
- ・水平固有振動数:  $F_n = 0.5 \text{ Hz}$ , 減衰: 10~15%
- ・鉛直固有振動数:  $F_n = 5 \text{ Hz}$ , 減衰: 5% 程度

この仕様に基づき試作した高減衰積層ゴム ((株)ブリヂストン製) の断面図を図一に示す。次章で示す総重量 140 t の実大構造物を 4 体で支えるものとして、1 体当りの設計鉛直軸力は 35 t とした。設計目標値に相当する 1 体当りの設計目標剛性はそれぞれ、水平方向 ( $\pm 40\%$  変形時):  $K_h = 0.352 \text{ (t/cm)}$ , 上下方向 ( $\pm 30\%$  軸力変動時):  $K_v = 35.2 \text{ (t/cm)}$  となる。

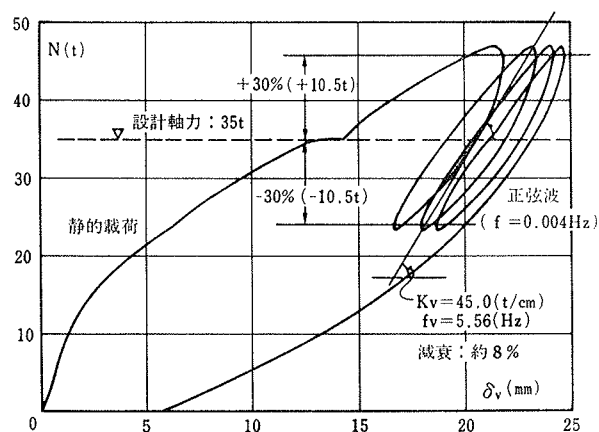
上下方向の免震・防振も考慮しているため、通常の積層ゴムに比べてゴム層は厚く、層数は少ないものとなっている。使用ゴム材料の基本物性を表一に示す。

### 1.2. 特性試験

上記積層ゴムの受入れ試験として、各積層ゴム単体に対して簡単な特性試験を実施した。目的は、①高減衰積層ゴムの基本特性を把握し、設計目標値との対応を調べ



図二 加力装置概要



図四 鉛直加力実験結果

ること、②実大構造物に設置する前に、各積層ゴムに様ななじみを与えることなどである。

図二に加力装置の概要を示す。静的アクチュエータにより鉛直荷重を加力し、水平方向には、動的アクチュエータにより動的加振を行なう。主な測定項目は水平・上下それぞれの方向の荷重と変位である。

各積層ゴムに対して、①鉛直加力試験、②水平加力試験の順で試験を実施した。以下にその内容を示す。

#### (1) 鉛直加力試験 (準静的試験)

鉛直設計軸力: 35 t まで載荷した後、設計軸力に対して  $\pm 30\%$  の荷重振幅 ( $\pm 10.5 \text{ t}$ ) を、正弦波で強制加振 ( $f = 0.004 \text{ Hz}$ ) した。

#### (2) 水平加力試験 (動的試験)

35 t の一定軸力を加えた状態で、図三に示す漸増変位振幅を強制加振 ( $f = 0.5 \text{ Hz}$ ) した。この標準加力サイクルを一体につき 10 回加えることにより、試験体になじみを与えると同時に繰返しの影響を調べた。

### 1.3. 試験結果と考察

#### (1) 鉛直加力試験結果

図四に鉛直加力による荷重～変位関係を示す。約 5

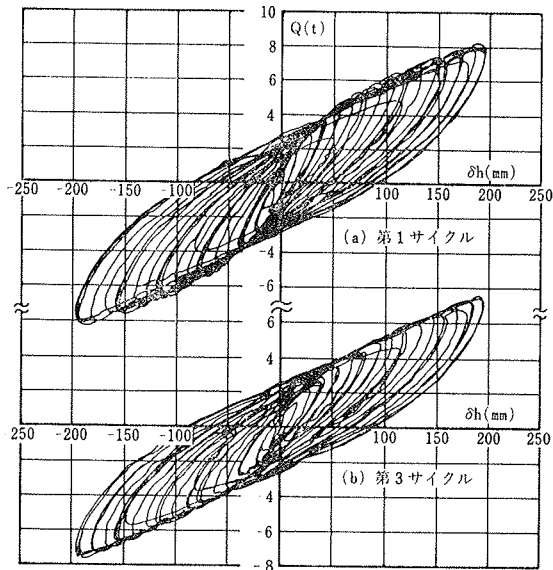


図-5 水平荷重～水平変位関係

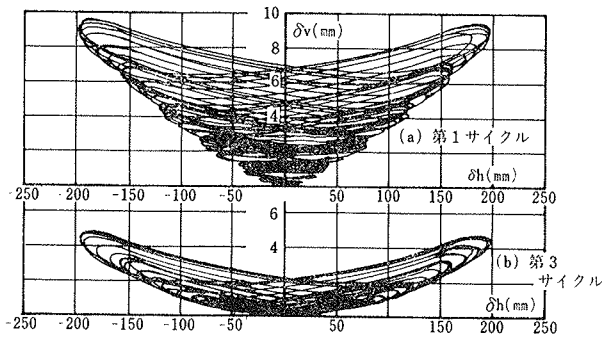


図-6 水平変位～沈み込み変位関係

分で軸力 (35 t) を導入し, その約 5 分後に加振を開始したため, 初期クリープの影響を含んでいる。この試験状況で測定された鉛直剛性は, 約 45 t/cm ( $f=5.56$  Hz) であり, 設計目標値に比べ 1.28 倍の値となった。また, 等価粘性減衰定数は約 8% 程度であり, 設計目標値を十分確保している。

(2) 水平加力試験結果

図-5 に荷重～変位関係を, 図-6 に水平変位～沈み込み変位関係を示す。(a) 第 1 と (b) 第 3 サイクルを比較して, 両図とも多少異なった特性を示した。これは, 高減衰積層ゴムに顕著な初期なじみの現象である。水平方向の復元力特性は, なめらかな紡錘形を示している。

変位振幅に対応する割線剛性, 及び等価粘性減衰定数を図-7, 図-8 に示す。

剛性は変位振幅に依存し, 振幅が小さい程高い性状を示す。また, 繰返しによる剛性低下は, 初期なじみ (第 1 サイクルから第 2 サイクル) 以後はあまり顕著ではなく, 1 サイクル当り 5% 以内に収まっている。

一方, 等価粘性減衰定数は変位振幅によってあまり左右されず, 今回の試験振幅レベルでは振幅が小さくなる

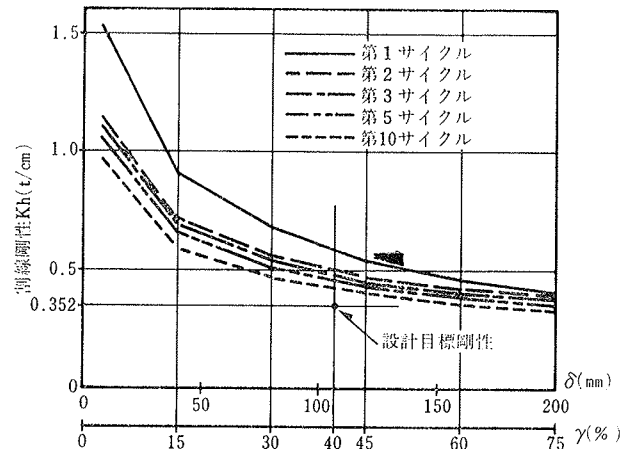


図-7 変位振幅に対応する割線剛性

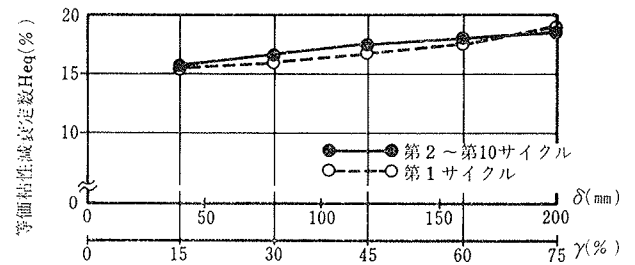


図-8 変位振幅に対応する減衰性能

に連れ若干低下する傾向を示した。また繰返しによってもほとんど変化しない。

設計目標との対応では, 剛性は設計目標値の 1.2~1.4 倍を示し, 等価粘性減衰定数は設計目標値の上限である 15% を上まわった。

以上の結果より, 今回試作した高減衰積層ゴムは設計目標値に対して若干の差異が生じたが, 免震性能に影響する程ではなく, 免震装置として良好な特性を持つことを確認した。また, 微小変位レベルでの剛性は設計目標値に比べてかなり高くなっており, 防振性能に多少影響を及ぼすと考えられるが, これについては次章以降に述べる。

2. 微振動

ここでは, 前章で説明した高減衰積層ゴムを, 大林組

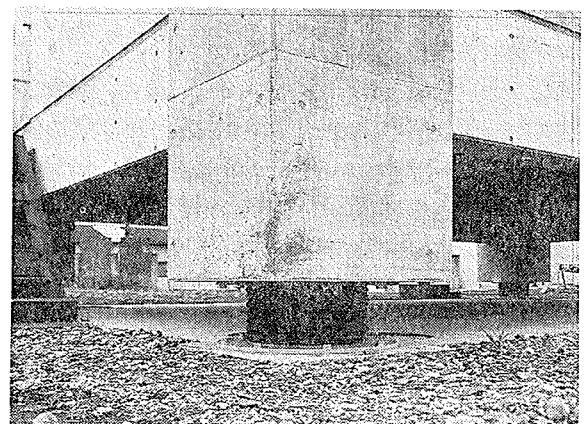
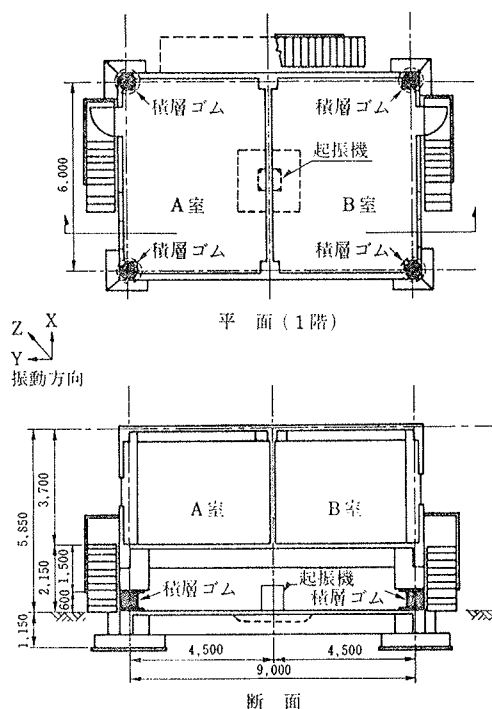


写真-1 高減衰積層ゴム設置状況



図一9 建屋平面図・断面図

技術研究所内に建設された音響多目的実験棟に適用し、この建屋の特性、性能を把握するために行った各種の振動実験のうち、微振動に関する実験結果について報告する。

低レベルの振動は振動レベルの大きさと周波数範囲に応じて公害振動と先端技術産業の精密環境で問題となる微振動とに分けられ、総称して環境振動と言われており、これらに対する防振技術の確立、追究が続けられている。

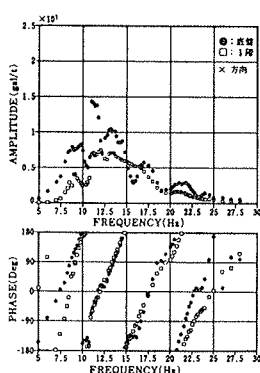
公害振動の場合、対象となるのは主として外部の振動源であり、その振動レベルはおよそ60~80 dB、周波数は1~90 Hzとされている。一方、微振動問題においては、周波数は100 Hz程度以下、振動の大きさは0.03 (cm/s)以下とされており、公害振動よりも更に低レベルの振動を扱うことになる。この章で対象とするのは、このうちの微振動の防振に関してである。

2.1. 構造物概要

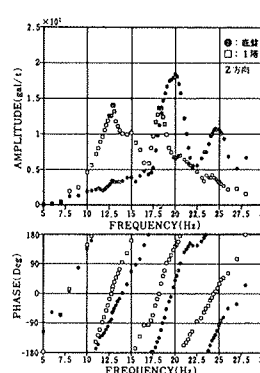
構造物の平面図と断面図を図一9に、また、高減衰積層ゴムの設置状況を写真一1にそれぞれ示す。構造物は、高さ5.9 m、平面形状9 m×6 mの長方形の一階建て建屋である。構造はRC造で、建屋の全重量は約140 tで、4本の柱で支持されている。

2.2. 実験方法

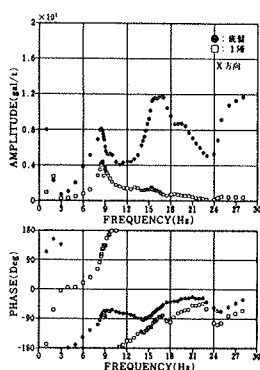
実験は、非免震時(積層ゴム取付け前で柱の継手部分が鋼板を介して一体となっている状態)と免震時(積層ゴム取付け時)の2段階の時期に実施した。加振方法は、起振機、人力加振及びトラック走行の3種類を用いた。



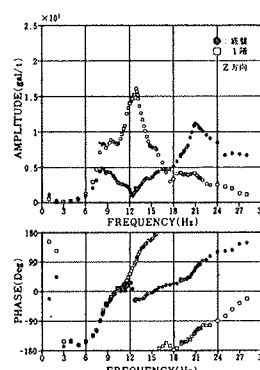
図一10 建屋外部基礎加振の共振曲線



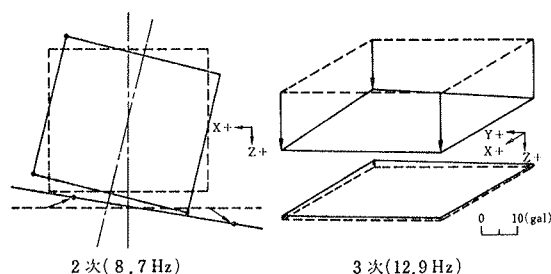
図一11 建屋外部基礎加振の共振曲線



図一12 建屋底盤中央加振の共振曲線



図一13 建屋底盤中央加振の共振曲線



図一14 起振機実験による免震時建屋の振動モード

起振機の加振位置は、図一9に示す建屋底盤中央と建屋中心線上で建屋の一つの長辺から10 mの距離に設けた起振機基礎(建屋外部基礎)とである。建屋の基本的な振動特性を把握するための加振源として、上下方向については偏心マス型起振機(許容最大回転数30 Hz、使用加振モーメント32 kg·cm)を、水平方向については人力加振(1人、2人、3人の各ケース)と上記起振機と

方向	固有振動数	減衰定数	変形量
水平	X	1.40 Hz 7.15% * (自由振動波形)	0.113~0.325 mm
	Y	1.44 Hz 7.09% * (自由振動波形)	0.128~0.350 mm
上下	Z	12.9 Hz 9.30%	約5.3 μm

注) \*印は、1人、2人、3人の人力加振の平均値である。

表一2 固有振動数と減衰定数(積層ゴム)

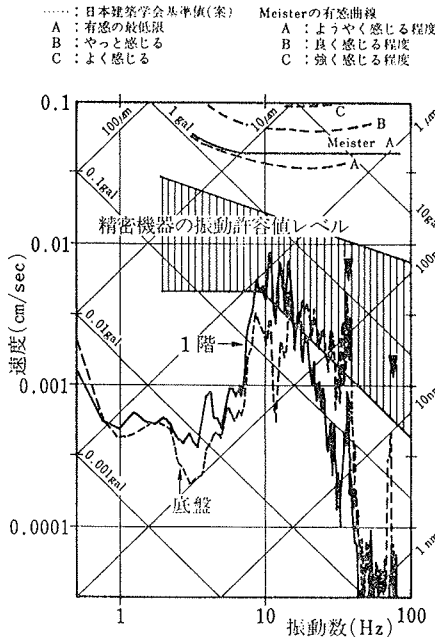


図-16 トラック走行時の振動(上下方向)

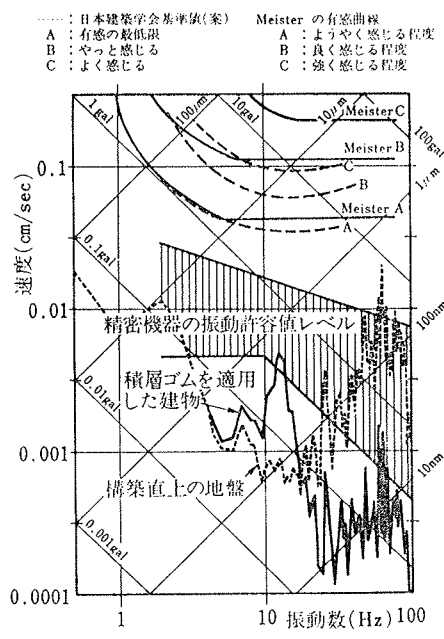


図-17 地下鉄構築直上建物への適用(上下方向)

を併用した。また、微振動の防振効果を調べる高振動数域対象の振動源として、電気油圧式起振機（加振力 300 kgf, 20~100 Hz）とトラック走行とを用いた。トラック走行は、時速 30 km で通過したときに 31.5 Hz と 63 Hz の振動が発生するように調整したすのこ状の板を通路の上に固定して実験を行なった。

### 2.3. 実験結果と検討

免震時の共振曲線の一例として、加振位置が建屋外部基礎と底盤中央のものを図-10~図-13に示した。図-10と図-11は建屋外部基礎の曲線であり、図-12と図-13は底盤中央加振の結果である。これらの曲線は加振力 1 tf で規準化してある。この起振機実験より得られた建屋の 2 次と 3 次のモード図を図-14に示す。また、共振曲線と入力加振の波形から得られた免震時の建屋の 1 次固有振動数と減衰定数をまとめて表-2 に示す。共振曲線からの減衰定数の算出は  $1/\sqrt{2}$  法による。表中には、最大変形量も示しておいた。1 次固有振動数は大変

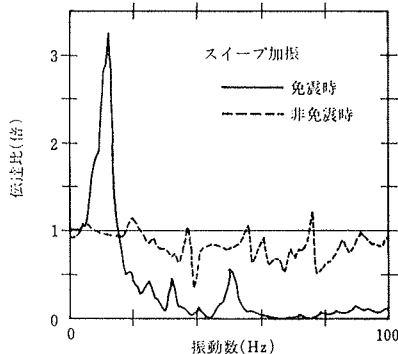


図-15 積層ゴム取付部上下の振動伝達比(上下方向)

形時を想定した設計目標値に比べると高振動数となっている。

これは、耐震設計の分野で対象としている変形量よりも小さいからである。

図-15には、底盤中央でのスイープ加振による積層ゴム取付部上下の上下方向の振動の伝達比を免震と非免震の場合について重ね書きして示す。この図をみると、免震時には、全体的には、30 Hz 以上の周波数帯域で 1/10 程度の防振効果があることがわかる。

図-16にはトラック走行実験による積層ゴム上部と下部の上下方向の振動を示す。この図から、トラック走行時には目標と

した 31.5 Hz と 63 Hz を含む 18 Hz 程度以上の振動数範囲で防振効果が認められる。

### 2.4. 高減衰積層ゴムを鉄道振動に適用した試験例

図-17にはこの構法の適用例として、地下鉄構築上にこの高減衰積層ゴムを持つ嫌振建物を建設すると想定した計算例を示す。ただし、ここでは地盤から底盤または基礎への入力損失効果は無視した。図から、18 Hz 程度より低い振動数範囲では建物振動が入力振動に対して増幅しているものの、精密機器の振動許容値レベルが図中許容値範囲の上限程度にある場合には、高減衰積層ゴムを用いた構法が防振上有効であることをこの図は示している。

## 3. 固体伝搬音

振動源から固体中に伝達し、固体中を伝搬する振動のうち、人体などに揺れや振動の形で感知されるものについては、前章で報告した。この章では、固体伝搬音に関する実験結果について報告する。固体伝搬音とは、固体振動のうち、最後に空気中に音として放射され耳に聞こえるもの、または、直接人体に振動として伝わり聴覚で感知されるものをいう。振動と固体伝搬音の関係を振動数で見ると、全身的な動きや揺れとして感じる 1 Hz 以下の領域、筋覚や触覚で感じる 1~100 Hz の領域、聴覚で感じる 20 Hz~20 kHz の領域に分かれる。振動と固体伝搬音とは、20~100 Hz でオーバーラップするが、40 Hz 以上では、聴覚の方が鋭敏となる。

### 3.1. 実験方法

実験は、非免震時と免震時について行なった。建屋の

加振方法は、次の四種類を用いた。①建屋前面道路に敷板を固定し、その上を10tの荷を積んだ6.5tトラックが走行したときに発生する振動を振動源とした。②建屋底盤中央に設置した電気油圧式起振機を振動源とし、30～400Hzの正弦波スイープ加振を行なった。③建屋底盤中央に設置した電磁式起振機を振動源とし、20～500Hzの各1/3オクターブバンド幅のランダム加振を行なった。④トラック走行時に発生する騒音をスピーカーで再生し、騒音のみ（地盤からの振動の影響がない）で加振した。

振動の方向は、環境振動の固体伝搬音領域では、水平方向よりも上下方向が大きい場合が多いこと、固体伝搬音は、建物の床面から放射されるものが大きい場合が多いことなどにより、上下方向を主に検討した。

3.2. 実験結果

図-18は、トラック走行時の底盤と一階床の上下方向振動加速度レベルである。一階床の加速度レベルは、底盤のレベルと比べて、20～80Hzでは、10～15dBレベルが低減しているが、100～400Hzでは、底盤よりもレベルが大きくなっている。図-19は、一階床の加速度レベルを、トラック走行により加振した場合と、騒音のみで加振した場合を比較したものである。一階床の加速度レベルは、トラック走行により加振した場合と、騒音のみで加振した場合は、100Hz以上の周波数帯域で良く一致している。従って、トラック走行時に地盤を伝わって建屋に侵入してくる振動は、100Hz以上の周波数帯域においても十分減衰しているが、騒音（空気伝搬音）により励起された振動は非免震時と同様減衰せずに残るために、トラック走行時の一階床のレベルが底盤よりも大きくなっていることが判明

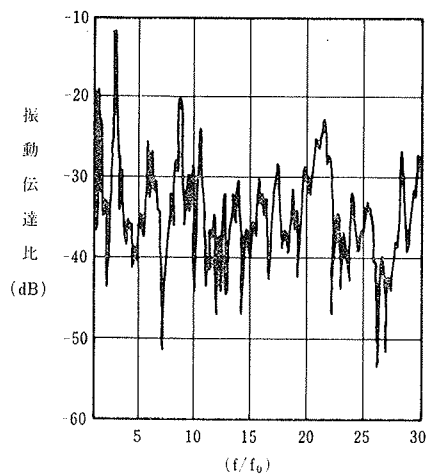


図-20 底盤と一階床の振動伝達比

した。

図-20は、底盤に設置した加振器によって、正弦波スイープ加振をしたときの、底盤と盤階床の振動伝達比である。全体的に見て、免震装置は20～30dBの防振性能がある。

3.3. 免震・防振システムの適用試算例

固体伝搬音対策は、録音スタジオ等で実施されている防振工法（躯体内側に遮音層を設け、二重構造とする）が主に用いられている。しかし、一般の建物では、ダクト等の遮音層貫通部で減音効果が減少する場合とか、面積の大きい遮音層にボードを用いると板振動によって防振効果が減少する場合などがあり、スタジオのように完全な浮き構造とすることが難しい。その点、免震・防振システムは、建物全体を浮かせる方法であるので、在来工法のように、不明瞭となる部位がなく、地下鉄などのように低周波成分の大きい固体伝搬音に対しても有利である。

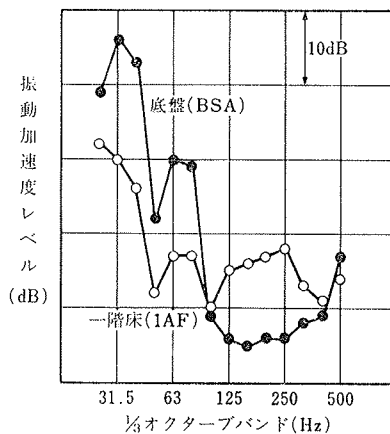


図-18 トラック走行時の振動加速度レベル

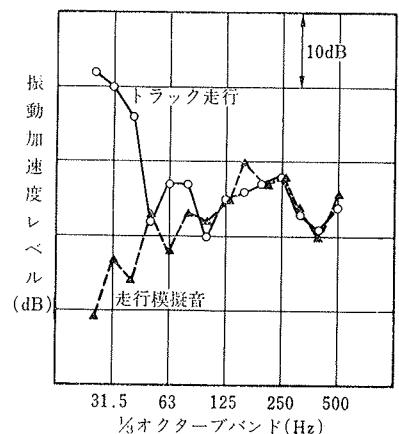


図-19 トラック走行加振と騒音加振時の比較

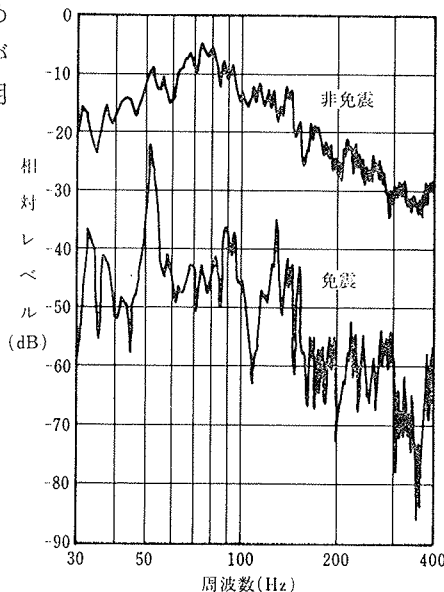


図-21 適用計算例（集合住宅M）

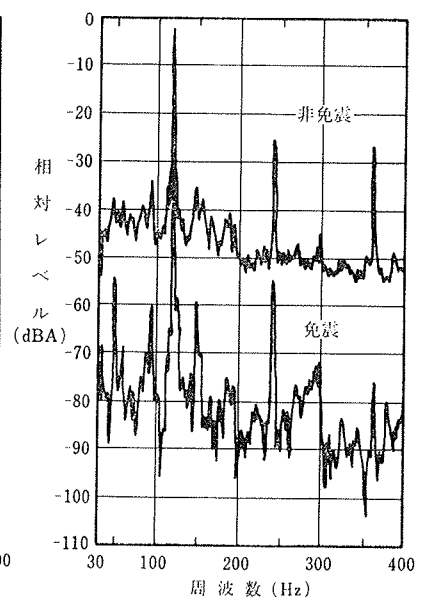


図-22 適用計算例（会議室K）

3.3.1. 集合住宅Mの場合 集合住宅Mは、地下鉄構築（土被り約7m）に水平距離約10mと近接した立地条件にある。この住宅の一階居室床面の上下方向振動加速度は、地下鉄通過時に図-21に示すスペクトルとなる。そのとき室内の騒音レベルは、46 dBA となり、音響的に見た住環境は良くない。この住宅に、免震・防振システムを適用したとすれば、居室床面の振動加速度は、図-20に示すように低減し、室内騒音レベルも、30~33 dBA となるものと予想され、居室または寝室として優れた音環境が得られるであろう。

3.3.2. 会議室Kの場合 会議室Kは、変電室に隣接しており、トランスの固体伝搬音によって、室内の音圧は、図-22に示すように特定の周波数成分が卓越したスペクトルとなっている。室内騒音レベルは、57 dBA であり、会議室としては、非常に悪い音環境にある。この対策として、免震・防振システムを適用し、トランスをシステムで支持したとすれば、図-22のように固体伝搬音は低減する。室内騒音レベルも30 dBA 程度と予想され、会議室として、優れた音環境が得られるであろう。

#### 4. 地震観測

この建屋では、免震効果について把握するため地震観測も行っており、いくつかの中小地震が観測されている。

地震自動観測装置は、技術研究所内各所に分散配置されている地震観測システムの一環を成しており、計測点は上下方向を含む5点である。

図-23に観測地震の例として昭和62年（1987年）6月30日の茨城県南西部を震源とする地震（東京震度Ⅲ）について観測波形を示す。図では、この建屋の一階床上で観測された波形と比較して、地表面における観測波形を、それぞれ水平方向について示す。この観測地震において

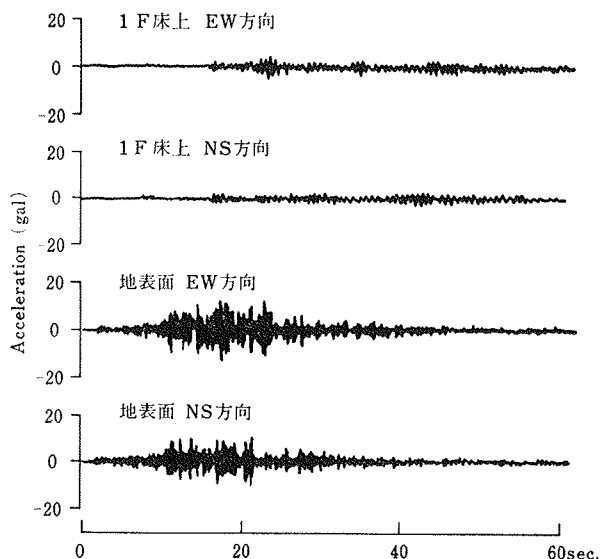


図-23 観測地震波形例

水平動振幅は地表面の振幅の1/3~1/4程度に低減されていることがわかる。

これらの地震観測を通じて高減衰積層ゴムを用いた免震システムの免震性能が実証された。

#### 5. おわりに

別論文で報告したように、技術研究所内のハイテク R & D センターには、免震用の標準積層ゴムと鋼棒ダンパー（減衰装置）を組み合わせたシステムが適用されている。一方、ここで報告した高減衰積層ゴムを用いたシステムは、ゴム自身が大きな減衰効果を有している。従って、ダンパーが不要で、上下振動をより低減することが特長となっている。

この免震・防振システムは、地震時には、建物本体を免震し、平常時には交通振動や機械・設備振動を防振するという効果的な適用によって、鉄道に近接した建物や、さらに条件の厳しい地下鉄上の建物やターミナルビルへの適用も期待される。また、減衰装置が不要なことから、システムの設置スペースが小さく、施工性も優れているので、適用試算例で示したような既存物件の対策としても、このシステムの適用を図っていきたい。

このシステムは、エンジニアリング本部免震プロジェクト部、本社設計第七部及び特殊工法部との共同開発によるものである。また、末筆ながら、(株)ブリヂストンの芳沢利和氏には多大な御協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

なお、高減衰積層ゴムを用いたシステムは、開発途上であり、今回報告したシステムよりもさらにグレードの高いものも現在、設計・計画中である。

#### 参考文献

- 1) 武田, 他: 構造物の免震に関する研究(その9, その10), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和61.8), pp. 803~806
- 2) 武田, 他: 高減衰積層ゴムを用いた免震・防振システムの開発(その1, その2, その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和62.10), pp. 799~804
- 3) R. A. Waller: Building on Spring, Rergamon Press (1969)
- 4) 日本建築学会: 第1回環境振動シンポジウム, 交通機関と環境振動, (1983.2)
- 5) 蔭山, 他: 微振動の解析システムの開発(その2) -設計手法とその評価-, 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 77~81
- 6) 日本音響材料協会: 騒音・振動対策ハンドブック, 技報堂, (1982.1)