

厚肉積層ゴムを用いた免震・除振システムの開発（その3）

——電車振動に対する先端医療施設の除振——

寺村 彰 吉原 醇一 中村 充 石川 理都子
安井 譲 鈴木 哲夫 岡田 宏

Development of Base Isolation System for Earthquakes and Micro-vibrations Using Laminated Thick Rubber Bearings (Part 3)

——An Application to a Medical Facility Building Subjected to Railway-induced Vibration——

Akira Teramura Jun-ichi Yoshihara Mitsuru Nakamura Ritsuko Ishikawa
Yuzuru Yasui Tetsuo Suzuki Hiroshi Okada

Abstract

A base isolation system using laminated thick rubber bearings was developed aiming for isolation of not only earthquake vibrations, but also micro-vibrations. This system was applied to a medical facility building in which several sets of high-technology equipment, such as for positron emitting computed tomography, were installed. The building was constructed at a site adjacent to a railway and was completed in March 1990.

This report describes the design technique for the base isolation system and the performance of the system applied to the building, especially from the point of view of an isolation technique for micro-vibrations.

Measurements of micro-vibrations were made in the building and the results show the appropriateness of the design technique and the effectiveness of the system against micro-vibrations.

概 要

本報告は、平成2年3月に躯体工事が完了した（財）東京都老人総合研究所の先端医療施設に採用された免震・除振システムの設計法とその効果の確認について述べたものである。

この建物に隣接する地上走行電車の振動が、建物内の医療用小型サイクロトロン、精密な電子検診機器、更には診療室の被検者などに影響することが予想されたため、厚肉積層ゴムの採用と上下ダンパーの開発を中心にして、地業対策も含めた総合的な除振対策をとることとなった。この結果、地表面上で40～50 galの振動を建物内で1 gal以下にまで低減することが可能となり、関連設備および診療業務に支障の無い環境を提供することができた。

1. はじめに

免震構法は、ハイテク R&D センター¹⁾、渋谷清水第一ビル等の免震建物の地震観測により、地震入力の低減に役立ち、また、つくば市の科学技術庁無機材質研究所の電子顕微鏡等の精密機器を収納する無振動実験棟²⁾で示されたように、道路交通振動の除振にも優れた効果を発揮することが確認されている。

本報告は、平成2年3月に躯体工事が完了した（財）東京都老人総合研究所のPET棟（Positron Emitting Computed Tomography 施設棟）の免震建物について述べたものである。隣接する地上走行電車の振動が建物内の医療用小型サイクロトロン、精密な電子検診機器、更には診療室の被検者などに影響することが予想されたため、この建物には免震構法が採用された。本報告では厚肉積層ゴムによる免震・除振システムの設計法と、その効果の確認について述べる。

2. 建物概要

敷地は図-1に示す様に電車線路に隣接し、建物は写真-1の奥にあるPET棟（以下免震建物あるいはA棟と呼ぶ）と同手前にある在来構造建物のB棟の2棟から構成されている。両棟共に図-2に示すように地下1階、地上2階建のRC造であり、基礎にはRC杭を用いている。A棟は、医療用サイクロトロンの放射線遮断厚壁や電磁場制御壁等があつて壁量が多いため、延べ床面積の規模（1,073 m²）のわりには建物重量が多く（約4,000 tf）、剛性の高い建物である。また、地盤概要を図-3に示す。

免震装置の配置を図-4に、姿図を写真-2にそれぞれ示す。以下に、この免震装置の構成要素とそれらの主な仕様を列挙する。①厚肉積層ゴム20個；天然系ゴム（表-1参照）、②鋼棒ダンパー¹⁾108本；特殊鋼棒（32Φ）の防錆仕様、③水平サブダンパー4本；微小振動用オイ

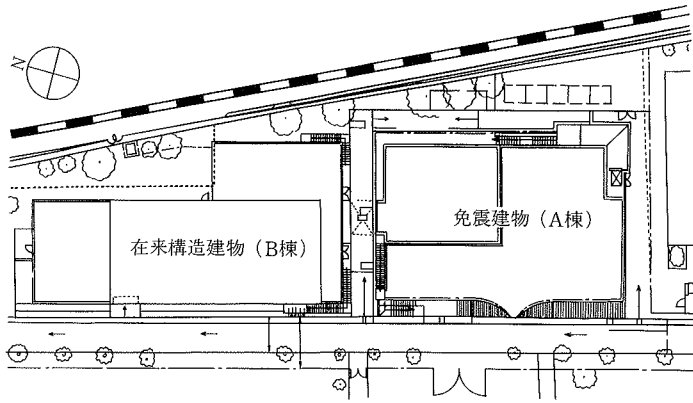


図-1 A棟(免震建物)とB棟(在来構造建物)の配置図

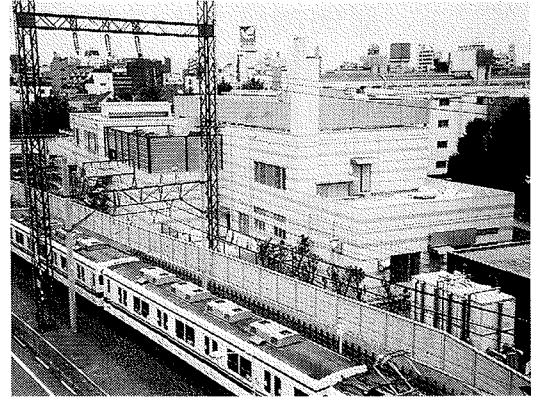


写真-1 建物全景

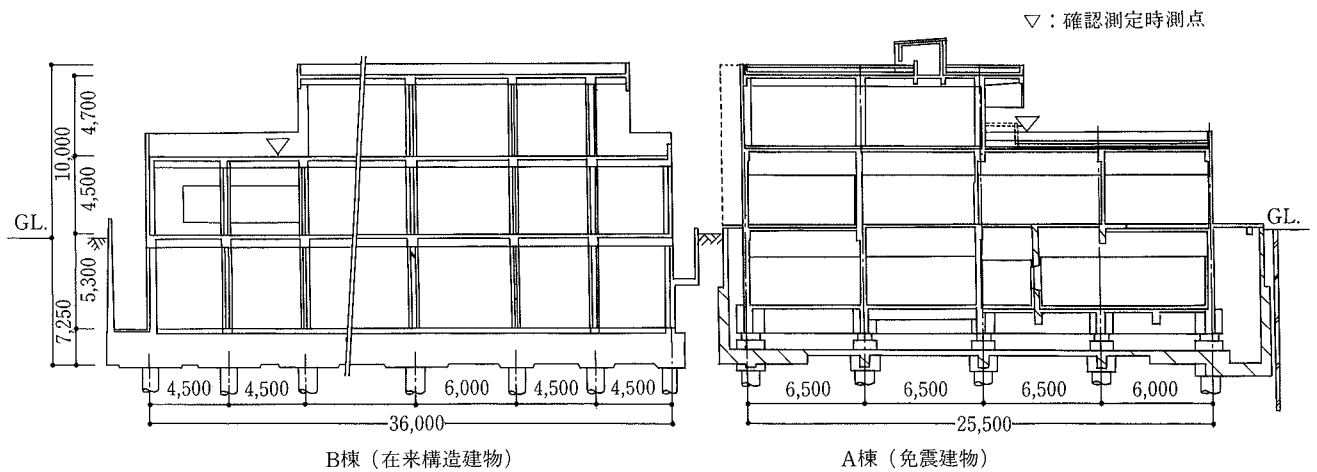


図-2 A棟(右側)とB棟(左側)の断面図

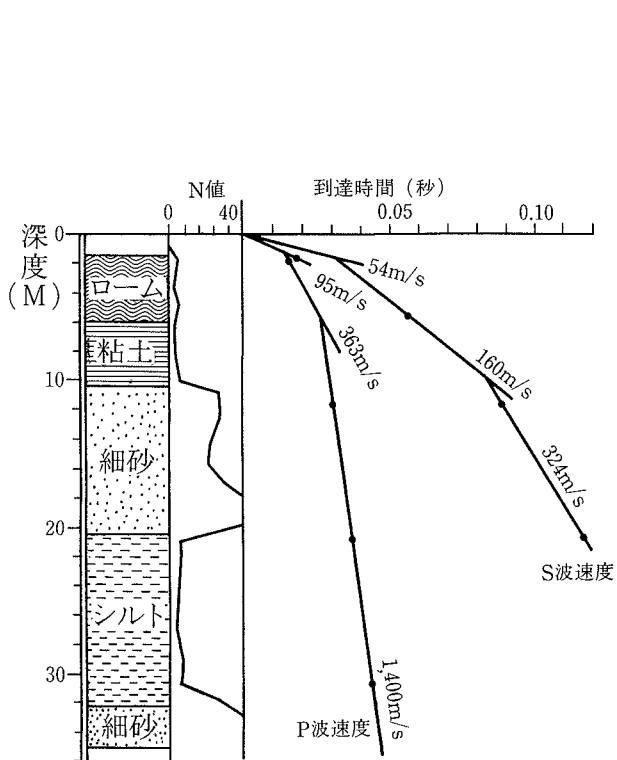


図-3 地盤概要

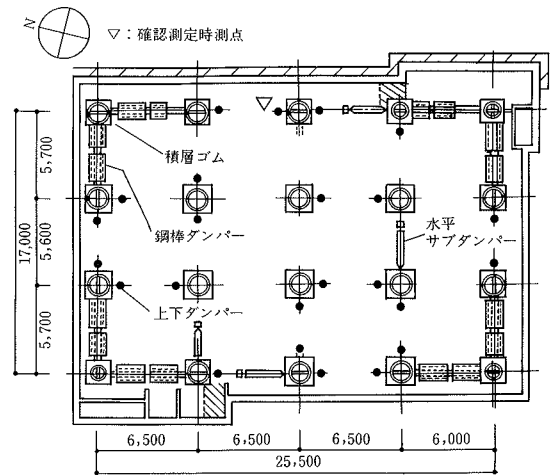


図-4 免震装置の配置図

表-1 厚肉積層ゴム諸元

設計用軸力	天然系積層ゴム	鋼板
100~150tf (8個)	厚46×1,050Φ(9層)	厚5.8×1,050Φ(8層)
160~190tf (3個)	厚48×1,100Φ(8層)	厚5.8×1,100Φ(7層)
210~300tf (7個)	厚47×1,200Φ(8層)	厚5.8×1,200Φ(7層)
310~350tf (2個)	厚41×1,200Φ(9層)	厚5.8×1,200Φ(8層)

ルダンパー, ④上下ダンパー24本; 多重鋼管式シリコン系粘弾性ダンパー (図-5 参照)。

3. 免震設計の概要

入力地震波は, El-Centro 1940 NS を含む記録地震波4波とサイトの地盤構造を考慮した模擬地震波2波の計6波を使用した。また, 地震動の強さは一次設計用を25 kine, 二次設計用を50 kine とそれぞれ設定した。

積層ゴムの耐震設計周期 (免震周期) T_0 は, 水平方向については2.6秒とし, 上下方向については電車振動の除振周波数域を考慮して0.2秒とした。

動的応答解析の結果, 水平方向50 kine 入力で上部構造物は各層共降伏強度以内に収まり, 免震装置は積層ゴムの許容変位の1/1.5以下に収まっていることを確認している。

上下方向については, 水平50 kine 入力に対応する強さの記録地震波の上下成分を用いて応答解析を行ない, ロッキング応答も含めて免震装置に引き抜きが生じないことなどを確認した³⁾。

4. 除振設計

4.1 事前調査

走行する電車から伝わる地盤振動が建設予定地盤に及ぼす影響と, その影響を軽減するために必要な対策を検討するために事前調査を実施した。

地表面における測定は, 線路から直交方向に距離5~50 m の範囲で行ない, 深さ方向に対する測定は, 5 m 地点の深さ35 m のボーリング孔を利用して行なった。以下, 線路直交方向をX, 平行方向をYとし, 深さ方向をZで表すものとする。図-6に, 地表面5 m 地点で観測された常時微動及び横棒で示す電車1本ごとの走行別の最大加速度を示す。常時微動では1 gal 以下の振動量であるが, 電車走行により30~40 gal の加速度が頻繁に生じていることがわかる。

最も大きな最大加速度は, 夕方6時半頃の下り急行電車通過時に生じた。この場合の最大加速度の分布を図-7に示した。建設予定建物は線路から水平距離約5~25 m に位置している。除振対策上, GL-12~20 m の細砂層で数 gal 程度であることは注目に値する。また, このデータから計算したFFT ランニング・ピークホールド・スペクトルを図-8, 図-9に示す。図-8は水平(Y)方向に関するものであり, 図-9は上下方向に関するものである。これらの図から, 卓越周波数は表層地盤の固有振動数の3~4 Hz, 8.5 Hz と, 電車・軌道構造に基づく20~30 Hz, 60~70 Hz にあることがわかる。

以上の測定結果から, 次の3つの地業対策が振動低減に効果的であることが推察される。

- ① 線路側を含む3面の地下工事用の土止め壁を, GL-12m まで地中振動遮断壁構造として利用する。
- ② 底盤は, 入力損失効果の大きい耐圧盤構造にする。

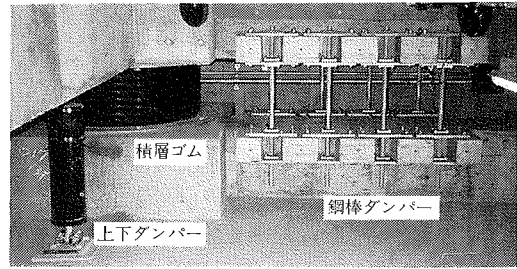


写真-2 免震装置姿図

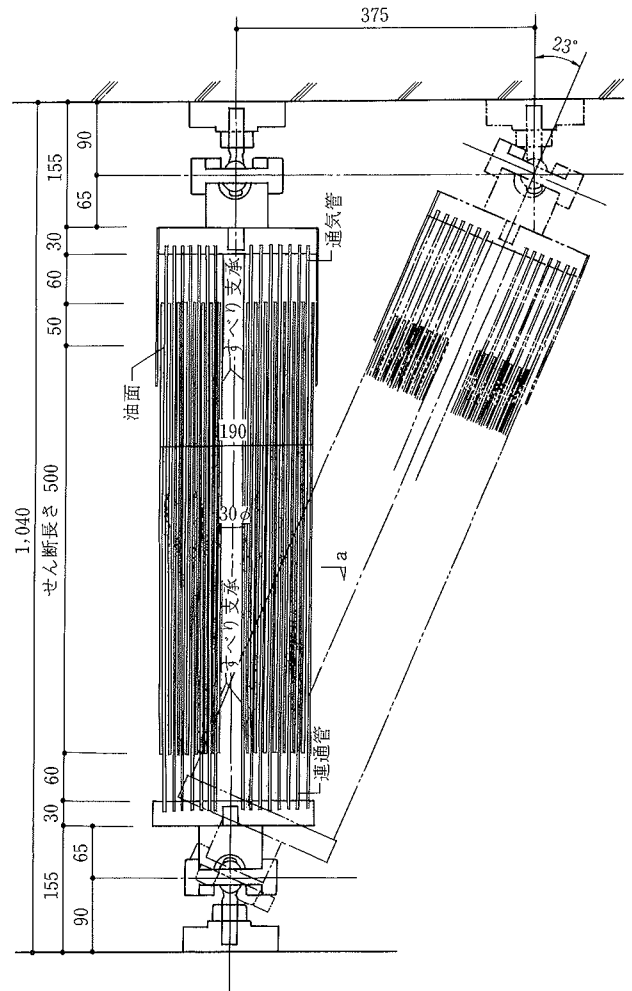


図-5 上下ダンパー詳細図

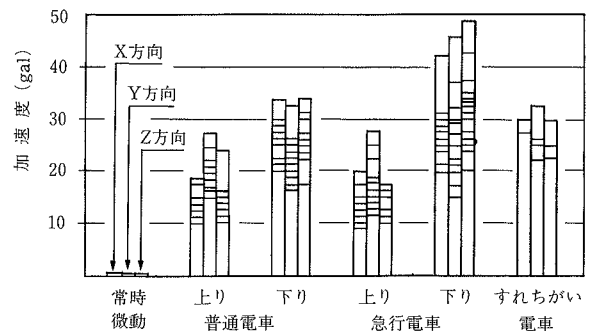


図-6 地表面5 m 地点の最大加速度

③ 底盤は、GL-12 m まで剛性の高い杭で支持させる。

4.2 除振設計法

A 棟の振動許容値は、1/3オクターブバンド解析によるピーク値で規定され、建物内各階床において水平方向が 50 dB (0.447 gal)、上下方向が 55 dB (0.795 gal) である。また B 棟には振動許容値は設定されていないが、地業及び耐圧盤構造を A 棟と同一構造として振動低減を図ることとした。図-10に除振設計フローを示す。

除振設計に当たり、電車通過時の地盤振動入力に対して、固有周期を可能な限り長くして入力の低減を図り、さらに適度の減衰性能を付与して共振応答をおさえることを意図して、詳細に検討した。

この結果、水平振動については、免震周期が2.6秒(微動時の鋼棒ダンパーの影響を考慮したとき0.9秒)と、電車通過時の卓越周波数 8.5 Hz (0.118秒) に比べて極めて長いので、水平サブダンパーを設けることにより十分な除振性能が期待できることが確認された。

また、上下振動に対する除振設計では、図-10に示す設計フローに基づいて検討した結果、除振周期 T を 0.15 秒以上、減衰定数 h を 10% 程度目標値とすることとした。この目標値を満たすために、免震周期 T_0 (0.2秒) を基準にして微動特有の変動因子を考慮する次式を作成し、事前に各因子の値を既存資料、実験データあるいは解析結果から求めた。

$$T = T_0 \cdot \sqrt{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot b \cdot c} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、

- a_1 ; 積層ゴムの剛性のバラツキに関する係数
- a_2 ; 積層ゴムの剛性の振幅・周波数依存係数⁴⁾
- a_3 ; 積層ゴムの経年変化に伴う剛性上昇率係数

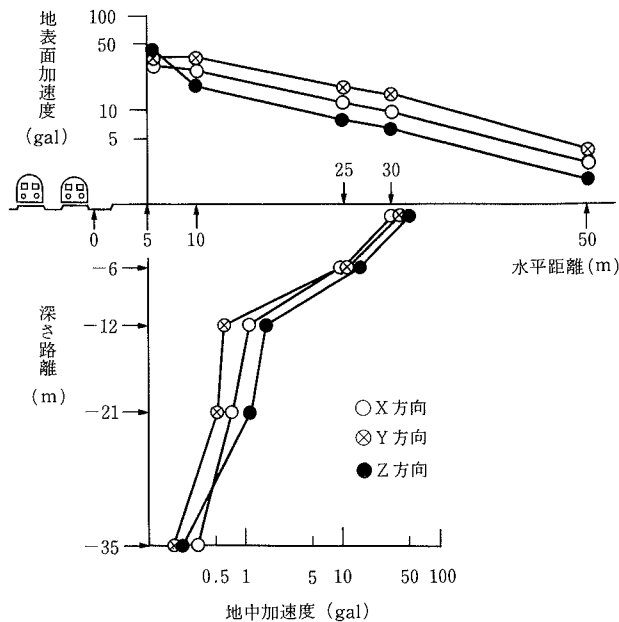


図-7 地表面及び地中の最大加速度分布

- b ; 杭・地盤連成効果に関する係数
- c ; 上下ダンパーによる剛性上昇率係数⁵⁾
(粘弾性材料の弾性ばねへの寄与分)

ここでは、 $a_1=0.96$, $a_2=0.65$, $a_3=0.89$, $b=1.11$, $c=0.86$ とそれぞれ設定した。なお、 c の値は上下ダンパーの減衰定数5%の除振設計目標値に相当する値である。

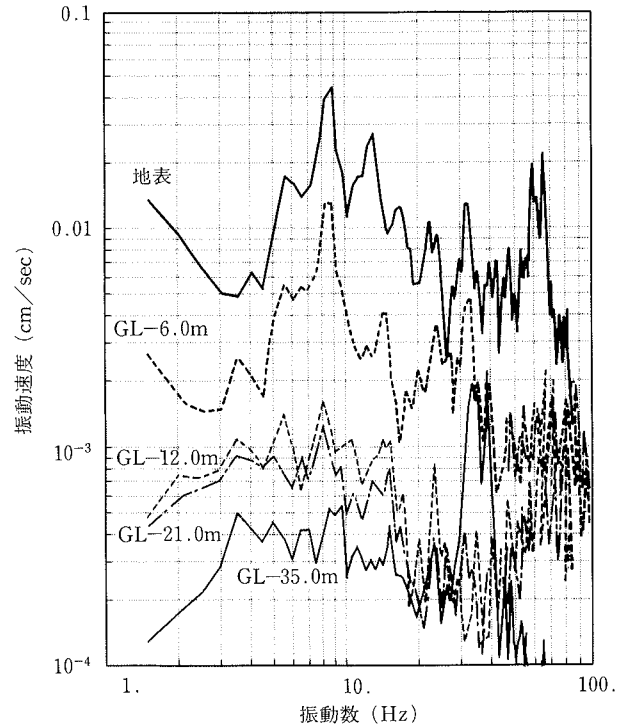


図-8 地盤振動の周波数分析結果 (Y 方向)

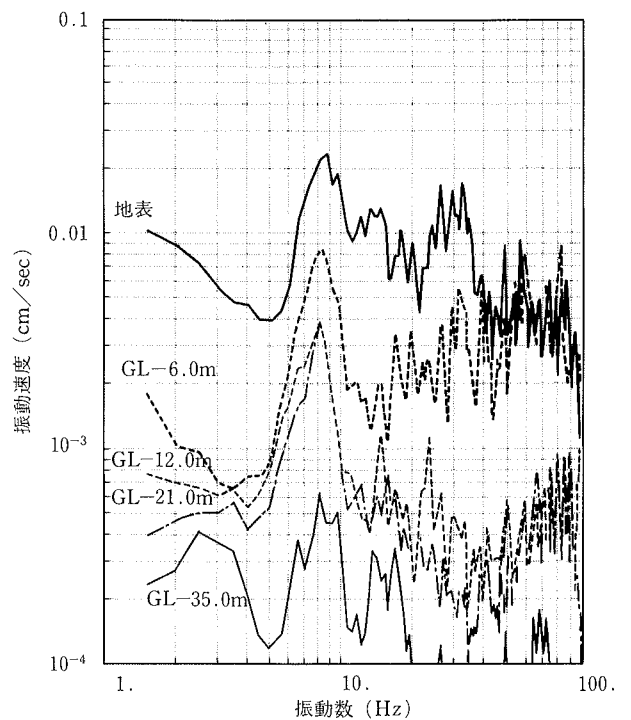


図-9 地盤振動の周波数分析結果 (Z 方向)

次に、減衰定数に関する検討を行なう。地盤連成を考慮した場合の減衰定数を求めるため、図-11に示すように質量 m_1, m_2 をもつ2質点系のモデルを用いて複素固有値解析を行なった。図中、 h_1 と ω_1 は免震建物の減衰定数と固有振動数であり、 K_v と C_v は半無限弾性波動理論から求めたばね定数と減衰係数である。図-12は免震建物の無次元化固有振動数 $\omega_1 r / V_s$ (r :底盤の等価半径) に対して連成系の固有振動数 ω と減衰定数 h を示したものである。免震装置の減衰定数は2%と5%の2種類を用いた。図中に免震建物の固有周期として0.15 (除振周期) ~0.20秒 (免震周期) にあたる部分を示してあるが、上下ダンパーに5%の減衰を付与すれば、この範囲において10%以上の減衰が期待できることがわかる。

これらの結果、微動時の上下方向の固有周期と減衰定数をそれぞれ0.15秒、10%程度に設定した。図-13に、厚肉積層ゴムで除振した場合のA棟の応答解析結果を示す。同図には、従来の薄肉積層ゴムを用いた場合の結果と、底盤への入力に用いたGL-6mの測定結果も示してある。医療機器に対して10 Hz以上の高周波振動の除振も重要であり、厚肉積層ゴムの除振性能の優位性が確認された。

5. 除振効果の確認測定

微動時の固有周期と減衰定数の調査は、電車通過時の

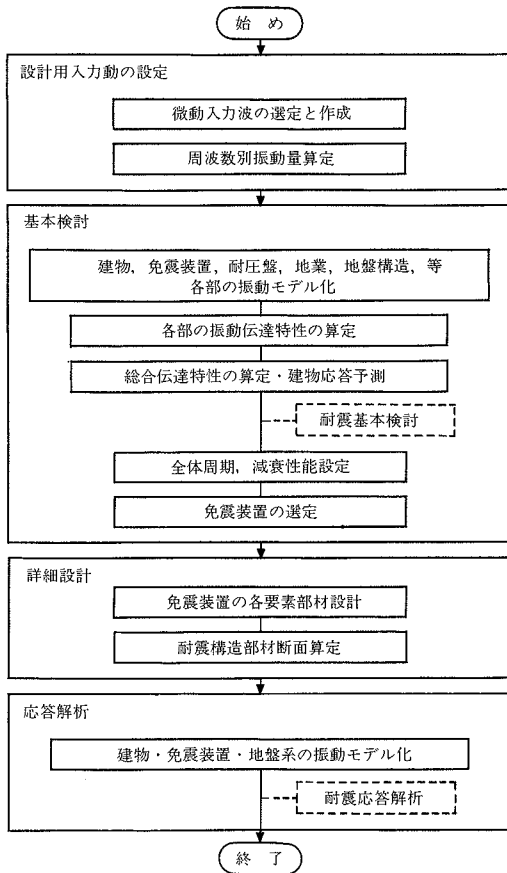


図-10 除振設計フロー

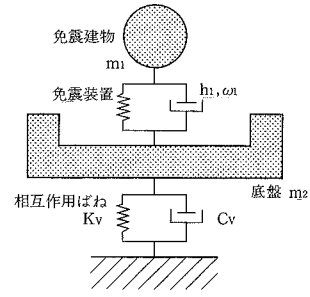


図-11 相互作用モデル

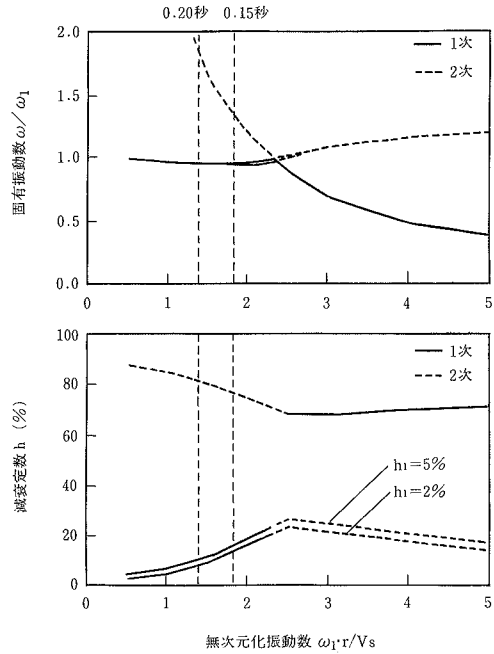


図-12 固有振動数と減衰定数

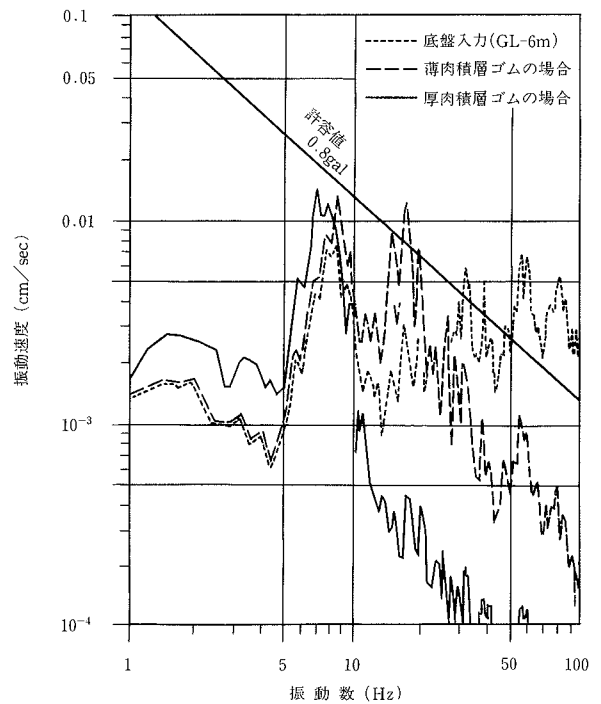


図-13 免震建物の除振性能の予測 (Z方向)

底盤に対する B 1 階の伝達関数, 荷重～変位曲線, 及び人力加振実験等で行なった。これらの実験結果を総合的に検討し, まとめて表-2に示す。

測定は工事過程を追って 2 回実施した。1 回目は未だダンパーが取り付けられてない「積層ゴムだけの状態」であり, 2 回目は水平オイルダンパーと上下ダンパーに鋼棒ダンパーも取り付けが終了した「躯体完成状態」である。

5.1 免震装置の伝達特性

躯体完成状態における電車通過時の, 底盤に対する B 1 階の伝達比の例を図-14に示す。下り電車の中から振動の大きい上位 5 本を平均したものを実測結果として採

表-2 免震建物の固有周期と減衰定数

特性		固有周期 秒, ()内Hz		減衰定数 %	
		設計値	測定値	設計値	測定値
積層ゴムの状態	水平	1.50 (0.67)	1.53 (0.65)	2.0	2.3
	上下	0.18 (5.68)	0.18 (5.68)	2.0	2.2
	ねじれ	1.09 (0.92)	1.17 (0.85)	2.0	2.3
躯体完成状態	水平	0.90 (1.11)	0.75 (1.33)	10.0	10以上
	上下	0.15 (6.70)	0.14 (7.0)	5.0	5.2
	ねじれ	—	0.75 (1.33)	—	—

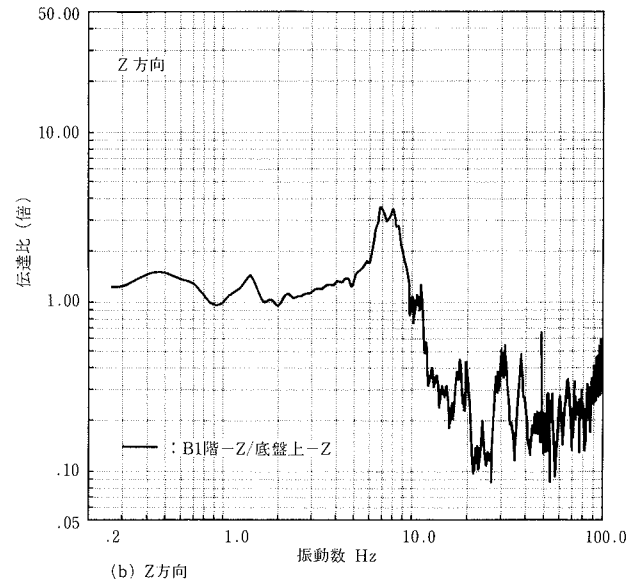
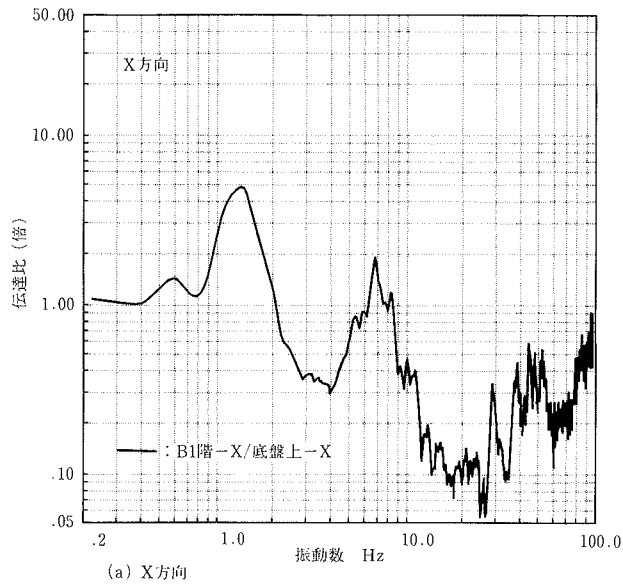
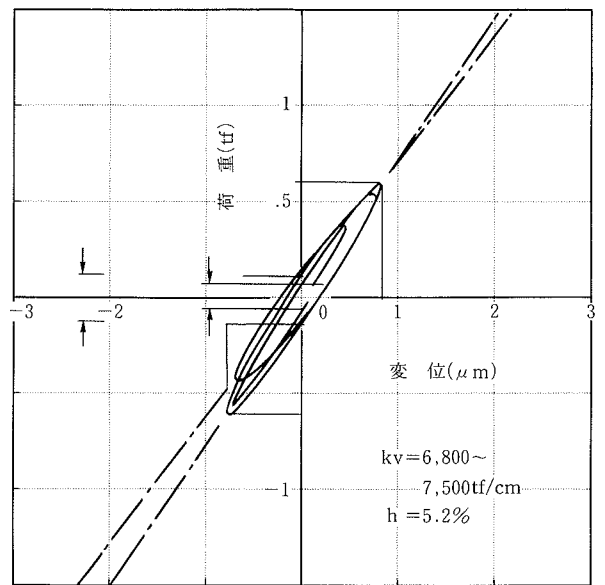
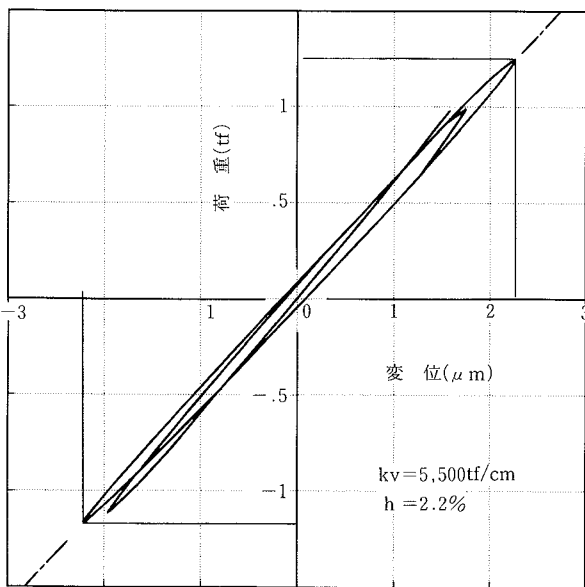


図-14 伝達比 (躯体完成状態)



(a) 積層ゴムだけの状態

(b) 躯体完成状態

図-15 電車通過時の荷重～変位曲線

用している。同図(a)の水平 (X) 方向の伝達比を見ると、1.3 Hz (0.77秒) に免震建物の固有振動数が、また 7 Hz (0.14秒) 付近に上下の固有振動数の影響が表われている。また、同図(b)の上下方向では、7 Hz に固有振動数が見られる。これらの値は、水平・上下ともほぼ設計目標値に近い。

5.2 微動時の剛性と減衰定数

図-15に、電車通過時に測定した加速度波形から求めた免震建物の上下の慣性力 (荷重) と、免震装置の相対変位の関係を示す。同図(a)は積層ゴムだけの状態であり、

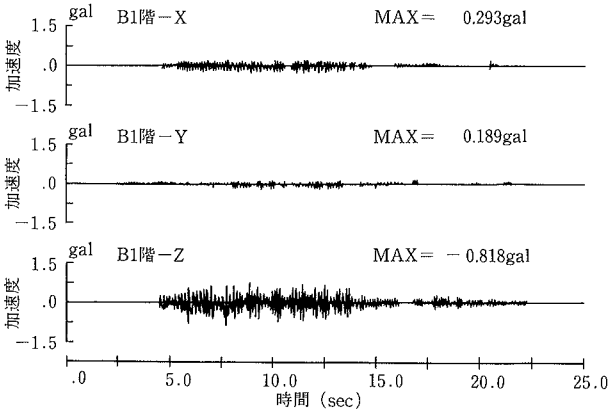


図-16 加速度波形 (躯体完成状態)

同図(b)は躯体完成状態に関するものである。これらの図から、積層ゴムの剛性を求めると、積層ゴムだけの状態の場合で 5,500 tf/cm、躯体完成状態で 6,800~7,500 tf/cm とそれぞれ得られた。積層ゴムの耐震設計剛性は 3,500 tf/cm であったから、いずれの場合も(1)式による予測値とほぼ対応している。一方、荷重～変位曲線から定めた履歴減衰は、ゴムだけの状態で 2.2%、完成状態で 5.2% と得られ、ほぼ設計目標値を満足していることが認められた。

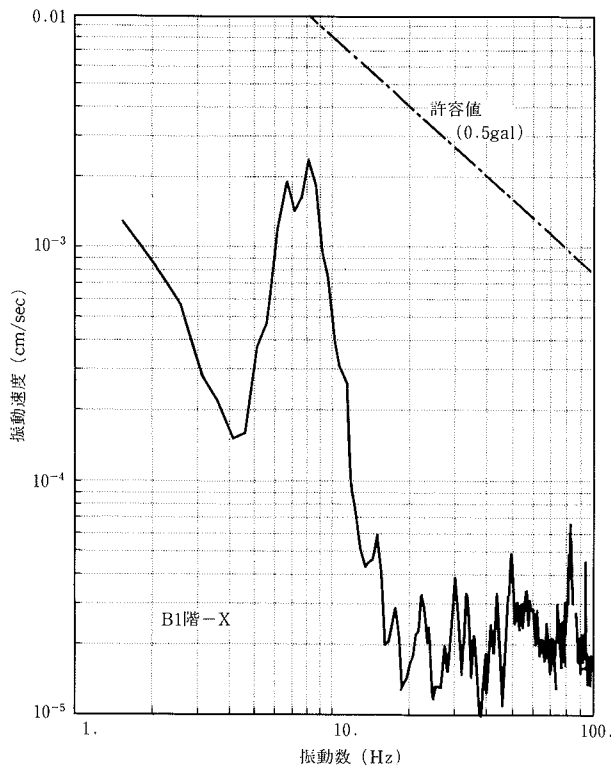
5.3 電車通過時の免震建物の応答

躯体完成状態における電車通過時の B 1 階 (図-4 の▽印測点) の時刻歴波形を図-16に示す。また、図-17には、同波形の FFT ランニング・ピークホールド・スペクトルを示す。図中には振動許容値も書き入れておいた。同図から、免震建物では、水平・上下方向とも、設計許容値以内に納まっていることが確認できる。

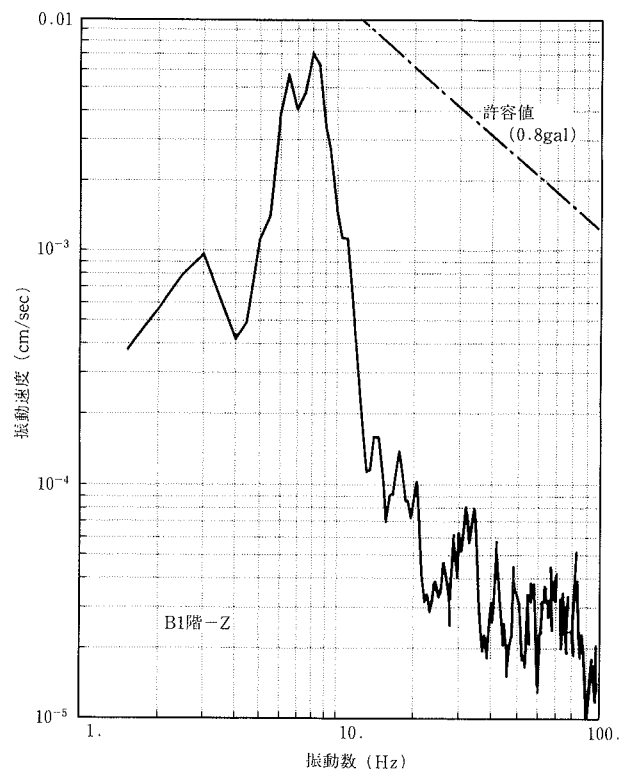
5.4 免震建物 A 棟と在来構造物 B 棟の振動量比較

図-2に示す A 棟と B 棟は、杭等の地下構造、地下 1 階、地上 2 階建の上部構造が類似している。従って、両建物の振動量を比較することは、免震構法の除振効果を検討する上で大変興味深い。両棟の 2 階 (屋上部、図-2 の▽印測点) で電車振動を同時測定した結果を以下に述べる。

図-18に電車通過時の A 棟と B 棟の 2 階の X, Y, Z の各方向の代表的な振動加速度波形を示す。A 棟と B 棟



(a) X方向



(b) Z方向

図-17 周波数分析結果 (躯体完成状態)

の最大加速度とその比を表-3に示す。同表からA棟のB棟に対する比は、約1/3～1/5と小さい。さらに最大加速度値についてみると、非免震建物では水平方向で1gal以上、また上下方向で2galを越えているが、免震建物ではそれぞれ約0.3gal, 0.76galでありほぼ知覚域以下であることが確認された。

6. おわりに

本報告は、線路際に建つ先端医療施設の除振を目的として水平動と共に、上下動の除振も兼ねる厚肉タイプ積層ゴムを採用した免震建物の設計法とその効果について述べた。

厚肉積層ゴムの採用と上下ダンパーの開発を中心に、地業対策も含めた総合的な除振対策をとることにより、8.5 Hz以上の周波数帯域の40～50galの地表面の振動を建物内で1gal以下に大幅に低減することが可能となった。その結果、医療用小型サイクロトロン及び関連設備の先端医療施設に対して、また、診療業務に支障の無い環境を提供することができた。

謝 辞

本研究の遂行に当たり、東京都財務局営繕部の方々及び㈱久米建築事務所の方々の多大なるご指導を得た。ここに記して謝意を表します。また、本研究は技術研究所、設計部、エンジニアリング本部、特殊工法部が協同して実施した成果をとりまとめたものであることを付記して関係諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 武田, 他: 構造物の免震に関する研究 (その3) - ハイテク R&D センターの設計概要と性能確認のための実験と観測について -, 大林組技術研究所報, No.36, p. 83~93, (1988)
- 2) 武田, 他: 超精密機器の除振施設に適用した免震建物, 大林組技術研究所報, No. 38, p. 69~73, (1989)
- 3) 日本建築センター: 日本建築センター性能評定シート BCJ-免27, ビルディングレター, (1989. 5)
- 4) 中村, 他: 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 -, 大林組技術研究所報, No. 42, p. 15~22, (1991)

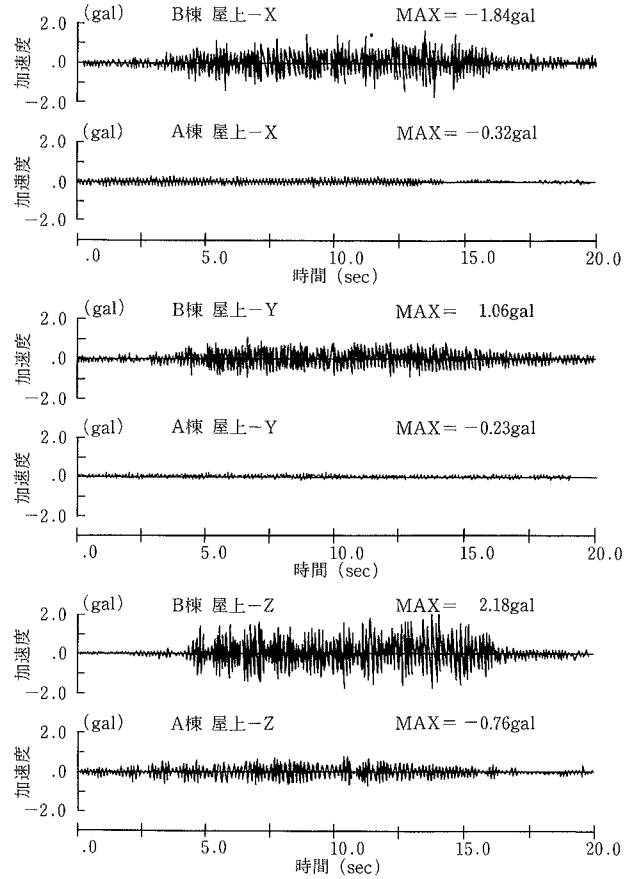


図-18 A棟とB棟の加速度波形の比較

表-3 A棟とB棟の最大加速度とその比

	A 棟	B 棟	比率A/B
X方向	0.316 gal	1.840 gal	0.17 (1/5.8)
Y方向	0.232 gal	1.060 gal	0.22 (1/4.6)
Z方向	0.761 gal	2.180 gal	0.35 (1/2.9)

- 5) 寺村, 他: 厚肉積層ゴムを用いた免震・除振システムの開発 (その2) - 上下用ダンパーの開発とその動特性 -, 大林組技術研究所報, No. 42, p. 23~26, (1991)