

鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性

Vibration Propagation of A Seismic Isolation Building near to Railway Tracks

山岸 邦彰 KUNIAKI YAMAGISHI
 岩本 毅 TAKESHI IWAMOTO
 谷垣 正治 MASAHARU TANIGAKI
 原田 浩之 HIROYUKI HARADA
 嶋田 泰 YASUSHI SHIMADA

建物における固体伝搬音の予測精度向上および免震構法による固体伝搬音の低減効果の把握を目的として、鉄道軌道近傍に建つ免震建物および周辺地盤の振動測定および解析的検討を行った。測定結果から、63Hz 付近の振動加速度レベルの卓越や建物基礎における 10~15dB 程度の入力損失など一般的傾向を確認したほか、免震装置の振動低減効果や基礎の挙動等を把握することができた。また、振動測定結果と解析結果が良好に一致することを確認した。

キーワード：免震建物，振動伝搬，固体伝搬音，伝達関数，位相速度，位相遅れ

Measurements and analytical studies of vibration at a seismically isolated building and nearby field located alongside railway tracks were carried out in order to improve the prediction capability of structure born sound and the confirmation of its reduction by seismic vibration systems. The results showed the general tendencies of predominant vibration acceleration frequencies at around 63Hz, and an input loss of 10-15dB at the basement. The vibration reduction effect of isolators and basement behaviors were recognized. It was also shown that numerical analyses could explain some of the measurement results.

Key Words: Seismic isolation building, Vibration propagation, Structure born sound, Transfer function, Phase velocity, Phase delay

1. はじめに

近年、都市中心部における集合住宅等の建設が増加傾向にある中で、交通振動に伴う音環境の悪化が懸念される。特に問題となる固体伝搬音は事後対策が困難なことから、企画・設計段階においてその影響を予測し、適切な対策を施すことが重要となる。一方、最近では固体伝搬音の低減効果があるとして免震構法の有効性について論じられることが多くなってきている。室空間における固体伝搬音レベルの予測は、加振源、地盤の波動伝搬、地盤と建物の相互作用、建物内波動伝搬、音響放射等の各特性の把握が重要であるが、予測精度の向上に寄与する測定データはまだ不足しているものと考えている。

本報では、固体伝搬音の予測精度の向上、および免震構法による固体伝搬音の低減効果の把握を目的として、その基礎資料を得るために行った鉄道軌道に近接する免震建物の振動測定結果について報告する。また、免震構法による固体伝搬音の低減効果について解析的検討を

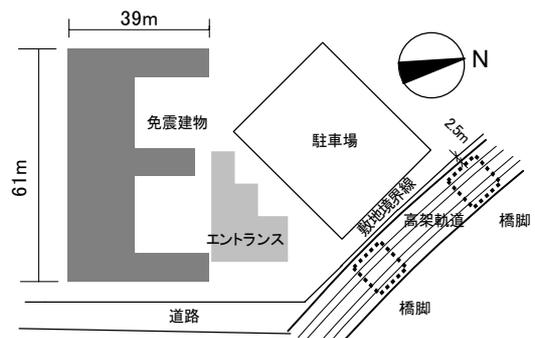


図-1 配置図

行った結果について報告する。

2. 対象建物および測定概要

図-1 に測定対象建物の配置図を示す。敷地境界線から最短で約 2.5m 離れたところに高架軌道が存在する。高架軌道の橋脚は RC 造ラーメン形式であり、その位置を図-1 に示す。高架軌道を通過する列車の速度はばらつきはあ

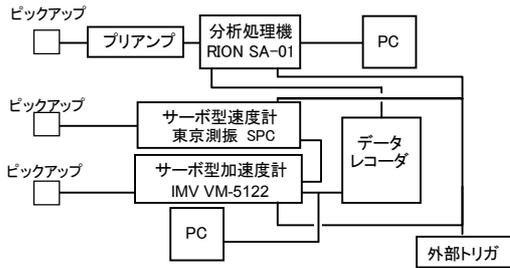


図-2 測定ブロック図

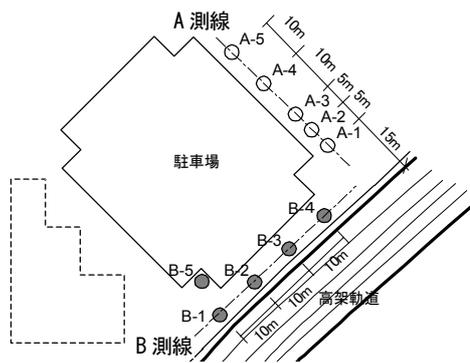


図-3 測定位置

るが 50~60km/h 程度であった。対象建物は、地上 20F、RC 造の集合住宅であり、セットバックのない E 型の平面形状である。桁行方向はラーメン構造であり、張間方向は耐震壁が配置されている。免震構法は鉛プラグ入り積層ゴム（一部は直動転がり支承）を配置した基礎免震構法であり、基礎は GL-4.75m を床付けとする直接基礎である。

計測は、(1)地盤における振動伝搬、(2)建物基礎における入力損失、(3)免震層における振動伝搬、(4)建物内の振動伝搬、の各特性を把握することを目的に測定点を設定した。各測定点の配置および結果については関連するセクションで述べる。図-2 に測定ブロック図を示す。計器はサーボ型および圧電型加速度計、サーボ型速度計であり、速度計については回路上で微分して加速度に変換する。サンプリング周波数はサーボ型が 1kHz、圧電型が 1.28kHz である。また、サーボ型ピックアップの測定限界振動数は約 100Hz である。各計器は外部トリガ信号により同期が取られている。

3. 測定による各種振動伝搬特性

(1) 地盤における振動伝搬特性

a) 測定点および鉄道振動の振動数特性

図-3 に測定位置を示す。A 測線は鉄道振動の距離減衰特性、B 測線は波動の到来方向を把握するための測線である。また A 測線については設置方法による測定結果の差異を確認するため、地盤面と縁石上で同時測定した。地盤面の測定は、足で十分締め固めた地盤上に直接ピックアップ

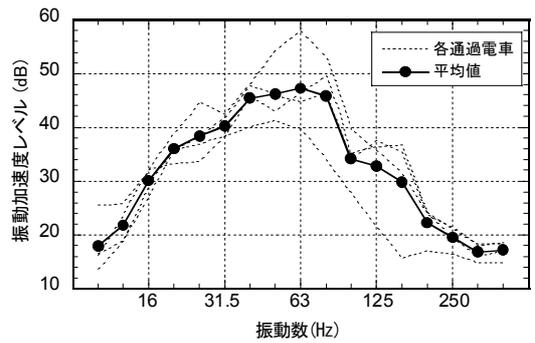


図-4 電車通過時の A-1 における振動加速度レベル

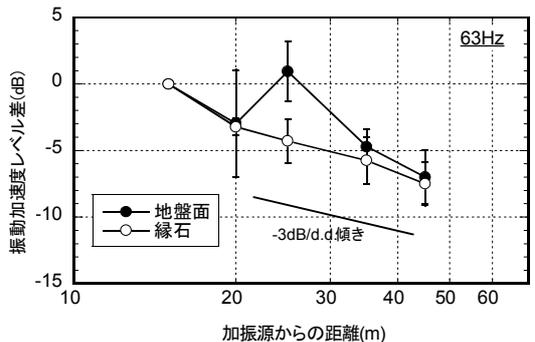
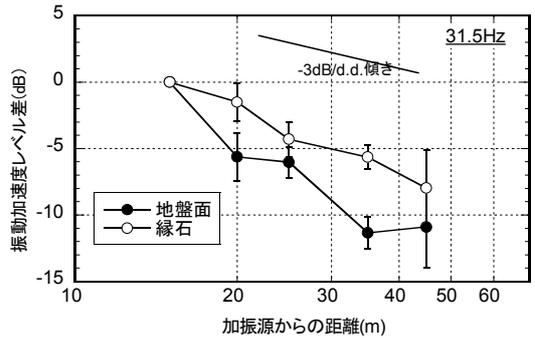
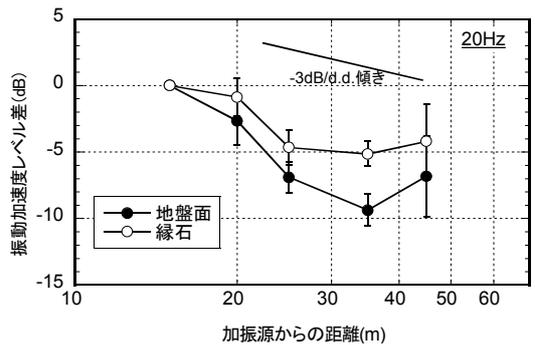


図-5 距離減衰特性(基準点 A-1)(上:20Hz,中:31.5Hz,下:63Hz)

を設置した。図-4 に A-1 の縁石上における電車通過時の振動加速度レベルを示す。分析は電車の通過時間内における時間波形を切り出し、Fourier 変換後 1/3 オクターブバンドごとにパワーを算出した。電車による振動については 63Hz 帯域が卓越した振動数特性を示すとされているが、本測定でも同様の傾向が見られた。

b) 距離減衰特性

図-5 に A-1 を基準点とした振動加速度レベル差を、3 個の 1/3 オクターブバンドの中心振動数 (20, 31.5, 63Hz) に

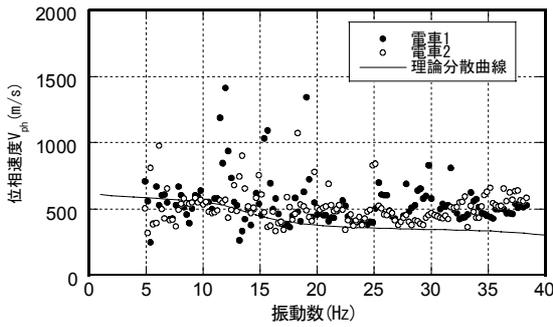


図-6 測定結果から算定した位相速度

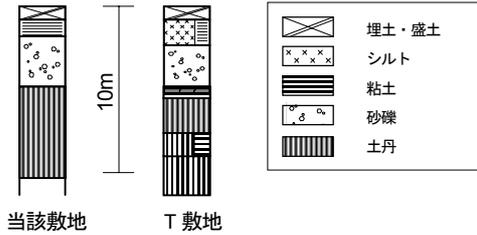


図-7 土質柱状図

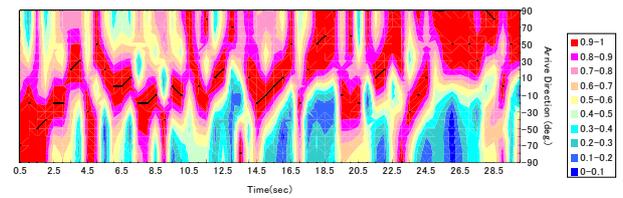
表-1 PS 検層結果

層厚 m	密度 t/m ³	P波速度 m/s	S波速度 m/s
1.7	1.6	400	170
10.7	1.8	1670	400
6.4	1.8	1670	650

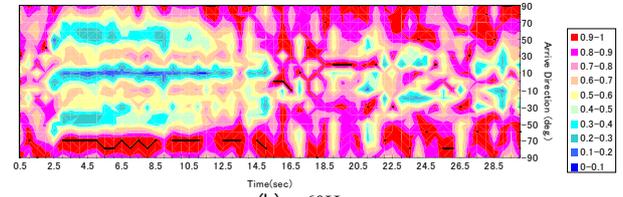
対して Rayleigh 波の幾何減衰曲線（傾き：-3dB/D.D.）とを重ねて示す。加振源からの距離が遠くなると振動加速度レベル差は小さくなる。おおむね倍距離で-3dBの減衰となっており、Rayleigh 波の幾何減衰に近い伝搬性状をしていると考えられる。縁石上と比較して地盤面における結果が凹凸とばらつきが大きくなっている理由として、ピックアップの設置共振が影響しているものと考えられる。地盤面を直接測定する場合はピックアップの設置方法を十分検討する必要がある。

c) 伝搬速度

図-6 に測定結果から算定した位相速度 V_{ph} を示す。位相速度は、A-1 と A-2 における 1 回の測定波形から時刻をずらした 40 個のアンサンブル平均によるクロススペクトルから算出した¹⁾。ばらつきはあるものの概ね V_{ph} は 400~600m/s 付近に分布し、高振動数ほど V_{ph} が低下する正分散を示している。当該敷地では PS 検層を行っていないが、当該敷地から約 750m 離れた地点（T 地点）では PS 検層を行っている。図-7 に当該敷地と T 地点の土質柱状図を示す。両者は地表面から約 2m までは粘性土もしくは粘土質シルト、約 2~4m 付近まで礫質土、約 4m 以深に土丹が現れるなど地質構成は似たものとなっている。したがって、当該敷地地盤のプロファイルは T 地点の PS 検層結



(a) 10Hz



(b) 60Hz

図-8 各中心振動数の波動の到来方向

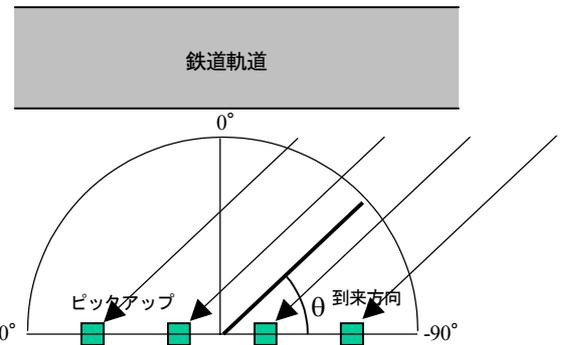


図-9 波動の到来方向の定義

果とほぼ同様であると考えられる。図-6 に T 地点の PS 検層結果（表-1）をもとに算定した Rayleigh 波位相速度の理論分散曲線を示す。測定より算出した位相速度と理論位相速度はほぼ等しい結果となっている。このことから図-6 に見られる分散は Rayleigh 波の分散と考えられ、地盤振動の主体が Rayleigh 波であることが推定される。

d) 波動の到来方向

鉄道振動がラインソースによる平面波と近似できれば、振動予測において 2 次元場の仮定が成立し、解析的検討を行う際の計算時間を低減することが可能であると考えられる。ここではその仮定の妥当性を確認するために semblance 解析²⁾による波動の到来方向の分析を行った。semblance 値 (S_c) は 0~1 の値をとる式(1)で与えられ、 S_c が大きいと波形の一致度が高くなる性質がある。

$$S_c = \frac{\sum_{j=k-N/2}^{k+N/2} \left\{ \sum_{i=1}^M f_{ij} \right\}^2}{M \sum_{j=k-N/2}^{k+N/2} \sum_{i=1}^M f_{ij}^2} \quad (1)$$

ここに、 f_{ij} は i 番目の測定点における時刻 j での振幅値、 k は S_c 値の中心時刻、 M は測定点数、 N は semblance 解析を行う時間間隔幅である。

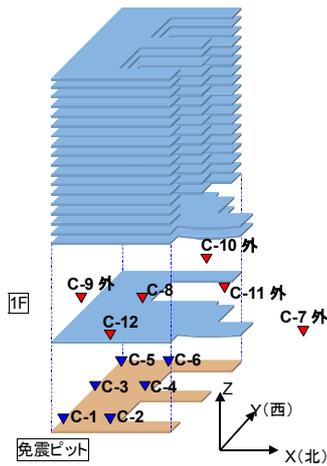


図-10 測定位置図

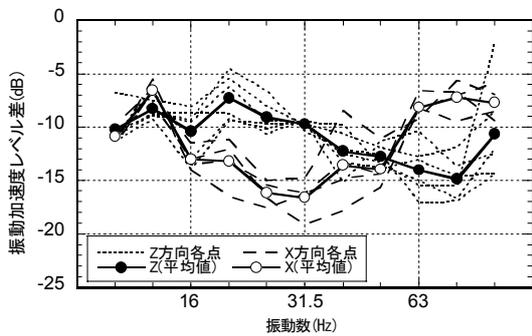


図-11 地盤面に対する基礎の振動加速度レベル差

解析区間を約 1 秒、0.5 秒おきに解析開始時刻をずらした、測定開始から約 30 秒間の解析結果を図-8 に示す。図は中心振動数 10、60Hz について示し、各時刻の Sc 値の最大値で基準化している。到来方向は図-9 に示す角度で表現され、軌道と直交する方向を 0° とし、-90° ~ 90° までの範囲とする。例えば、図-8 において Sc 値の大きい部分が 0 度に近いほど B 測線と直交する方向から波動が到来していることを意味する。中心振動数 10Hz では 0° 付近、すなわち B 測線と直交する方向が顕著であるが、中心振動数 60Hz では明瞭な傾向が見られなかった。地盤の形状が複雑なことや B 測線の測定器設置間隔が波長と比較して大きいことなどの理由が考えられる。高振動数領域で到来方向が明確に現れなかったことについて、フィールドを変更して再測定する予定である。

(2) 基礎の入力損失

a) 測定概要

測定位置を図-10 に示す。測定点は自由地盤に 4 箇所、免震階に 6 箇所、1F に 2 箇所の合計 12 箇所である。サーボ型ピックアップの測定システムを使用し、鉛直振動に加えて水平振動についても測定を行った。

b) 入力損失

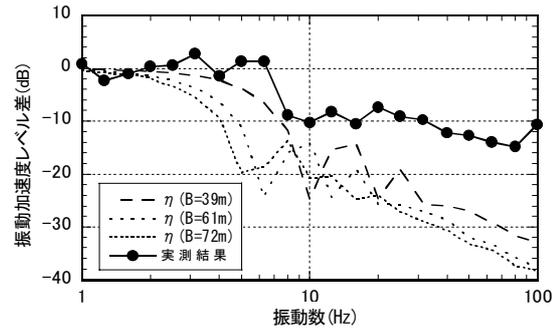


図-12 振動加速度レベル差の山原式と実測値の比較

図-11 に z, x 方向の自由地盤測定点 C-7 に対する免震階各測定点の振動加速度レベル差およびそれらの平均値を示す。z, x 方向とも 10~15dB 程度低下する。点線および破線が示すように、免震階の位置による差異は多少見られるが、入力損失の振動数特性は各方向ともほぼ同じ傾向にある。なお、他の自由地盤の測定点 C-10,11 は、測定点付近の造作物が強風により振動した影響で応答を正確に測定することができなかった。

図-12 に図-11 に示した z 方向の各点の平均値と、山原による入力損失の理論値 η^3 の 1/3 オクターブバンド値を示す。波動伝搬速度を支持地盤のせん断波速度である 400m/s、基礎長さは長辺方向、短辺方向、および鉄道軌道直交方向の実長（それぞれ約 61m, 39m, 72m）とした。測定結果は、数 Hz の低振動数帯域では理論値 η と近い値となっているが、高振動数帯域では 20dB 程度以上の差が見られる。理論式は半無限地盤、地表面剛体基礎を仮定しているが、特に高振動数帯域の差異が大きいことから剛体仮定が成立していないものと考えられる。

また、図-11 の x 方向が顕著であるが、63Hz 付近から入力損失（振動加速度レベル差）が小さくなっている特徴が見られる。このような特徴が現れる原因究明について今後の研究課題としたい。

c) 基礎内の振動伝搬

基礎が比較的長大である場合など、剛体挙動をしているとは看做せないと考えられる基礎の振動伝搬特性の基礎資料を得るため、基礎内の振動伝搬特性について検討する。鉄道軌道から最短距離にある測定点を基準点 (C-2) とした場合、他の測定点の位相遅れを図-13 に示す (図中●)。位相遅れはクロススペクトルから算定した。ばらつきはあるが位相遅れの推移は規則的な傾向にある。この位相遅れから算定した位相速度を図-6 に示した Rayleigh 波の理論位相速度と比較して図-14 に示す。比較のため図-13 に図-14 に示した基礎内位相速度から算定される位相遅れを示す (図中□)。両者は基準点に近い C-1/C-2 および C-3/C-2 で比較的良好な対応を示している。

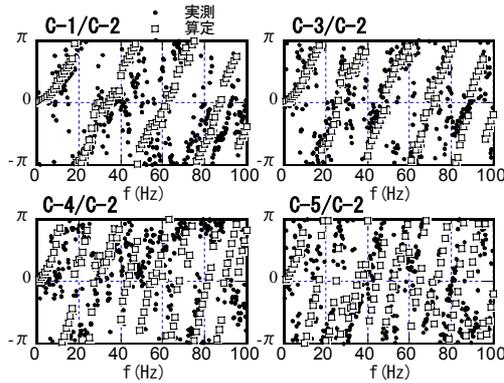


図-13 免震階各測定位置の位相遅れ

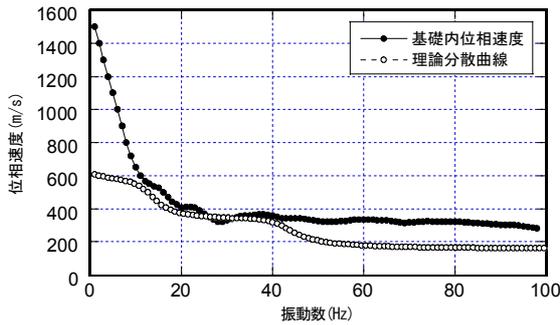


図-14 位相速度の理論値と実測値の比較

図-14 より 10~40Hz では基礎内位相速度と Rayleigh 波の位相速度がほぼ一致している。また、40Hz 以上の振動数帯域では 400m/s 以下程度となっている。このことから基礎はほぼ支持地盤面と同じような挙動をしているものと考えられる。

なお、40Hz 以上で基礎内位相速度と理論分散曲線とに差が見られるのは、理論分散曲線ではせん断波速度 170m/s の低速度層を含めて計算しているため、高振動数領域で位相速度が 170m/s に収束している。一方、基礎内位相速度は基礎底面が表-1 のせん断波速度 400m/s の層に位置しているため、最表層にあるせん断波速度 170m/s の低速度層の影響をほとんど受けていないことによりこのような差が生じたものと考えられる。

(3) 免震層の振動低減効果

a) 測定概要

測定位置を図-15 に示す。測定点は免震装置を挟む基礎部分の上下 3 箇所、免震階に 6 箇所、1F に 6 箇所の合計 15 箇所である。測定方向は測定ケース毎に同一方向とした。図-16 に示すように、免震装置を挟む上下基礎については圧電型加速度ピックアップを使用しワックスを使用して取り付けた。また、サーボ型ピックアップについては柱脚部に設置した。測定は入力損失の測定と同様に鉛直振動および水平振動について行った。

b) 測定結果

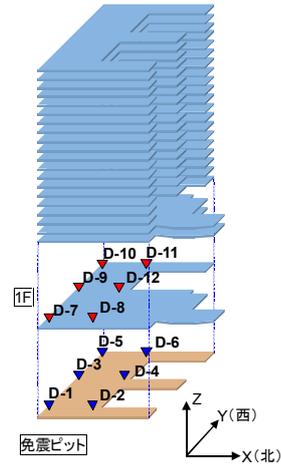


図-15 測定位置図

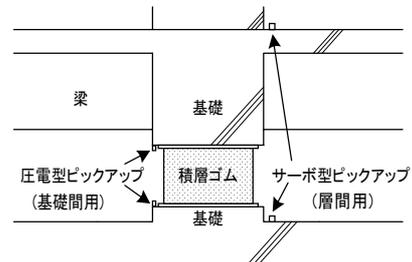


図-16 ピックアップ設置状況

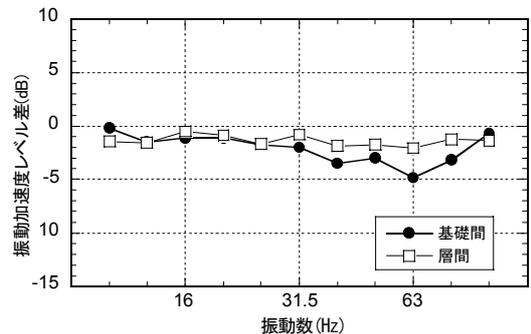


図-17 基礎に対する 1F の振動加速度レベル差(鉛直)

図-17 に免震装置を挟む上下基礎間 (以下、基礎間) と、免震階に対する 1F (以下、層間) の z 方向の振動加速度レベル差を示す。層間の損失率は各振動数でほぼ等しく、概ね 2dB 程度であるが、基礎間は、高振動数で低減量がやや大きくなる。層間のピックアップ設置を柱脚部の外部通路側としたが、この柱付近の梁やスラブの振動の影響を多少受けている可能性があるため、結果的に一部の振動数でレベル差に違いが出たものとする。以上の結果から対象建物において免震装置による振動の損失率は 2~5dB 程度であるといえる。積層ゴムの仕様に因るところが大きい、いままで報告されている 4. 項に示す積層ゴムの防振効果 (63Hz で 10dB 程度が多い) よりも小さい値となっている。

図-18 に x, y 方向の免震階に対する 1F の振動加速度レ

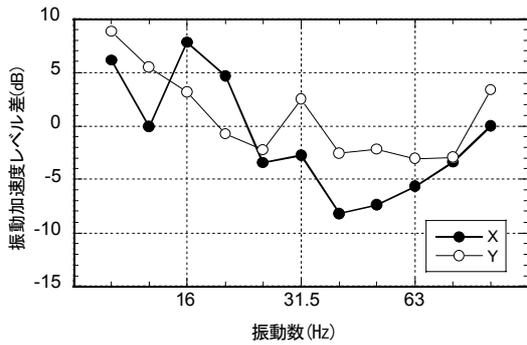


図-18 基礎に対する1Fの振動加速度レベル差(水平)

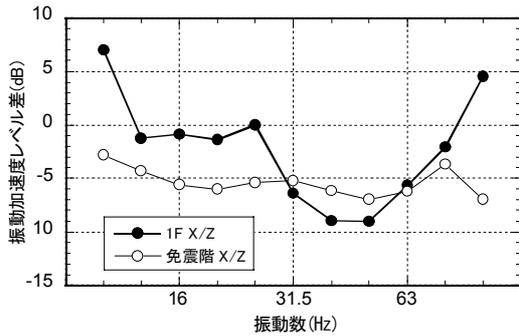


図-19 鉛直方向に対する水平方向の振動加速度レベル差

レベル差を示す。z 方向と比較すると鉄道振動の主となる 31.5Hz 以上において低減効果大きい。x および y 方向でレベル差に違いが見られるが、これは x が張間方向(耐震壁構造)、y が桁行方向(ラーメン構造)であるため、方向間における上部構造の剛性の影響が生じているものと考えられる。すなわち、耐震壁のある x 方向の上部構造は免震層と比較して水平剛性が高く、y 方向と比較して免震効果(低減効果)が大きいと考えられる。

図-19 に免震階および 1F における鉛直に対する水平(x 方向)の振動加速度レベル差を示す。免震層では比較的安定してその差が 5dB 程度となっている。これは、到来する波動の主成分が Rayleigh 波であることに起因するものと思われる。また、1F における振動加速度レベル差は免震階と比較してややばらつきが大きい。これは基礎に対する 1F の振動加速度レベル差の振動数による変化が鉛直方向に比べて水平方向が大きいことに起因するものと考えられる。いずれにしても固体音領域では鉛直成分が支配的であるが、水平方向も 5~10dB 程度小さいレベルで固体音に寄与していると考えられる。

(4) 高さ方向の振動伝搬特性

a) 測定概要

図-20 に測定位置を示す。ピックアップは免震階、1F、7F および 14F については柱脚部に、また、RF については防水層、断熱層を介した押えコンクリート上に設置した。一般階および RF におけるピックアップの設置状況を図

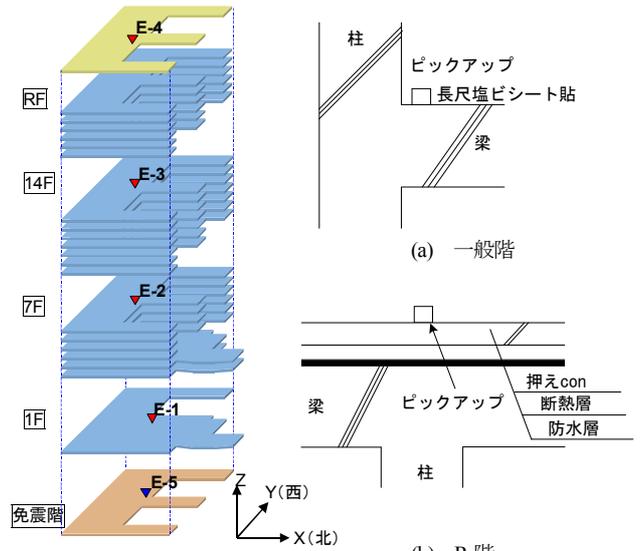


図-20 測定位置

図-21 ピックアップ設置状況

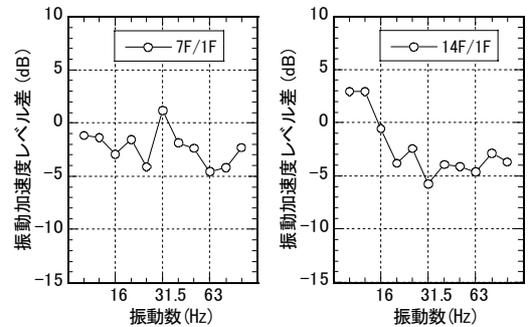


図-22 1F に対する各階の振動加速度レベル差

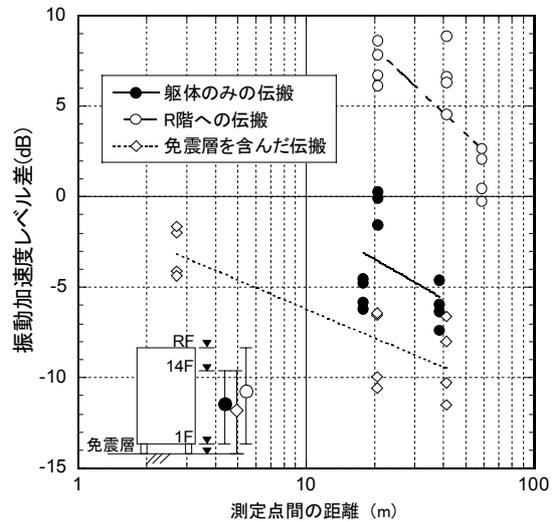


図-23 各測定点間の振動加速度レベル差(63Hz)

-21 に示す。階高は、免震階から 1F が 2,700mm、その他の階はすべて 2,960mm である。測定方向についてはすべて鉛直方向とした。加振源とする外乱は鉄道振動のほかに、1F に設置したピックアップ付近におけるハンマー打撃とした。

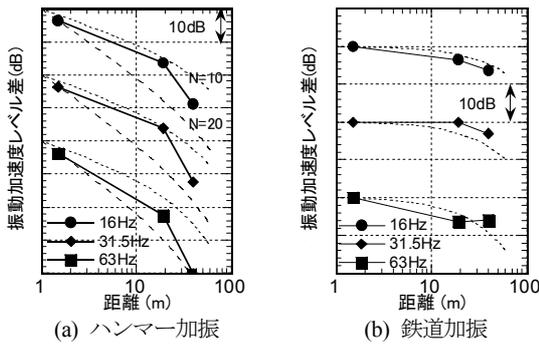


図-24 加振源ごとの建物内の距離減衰

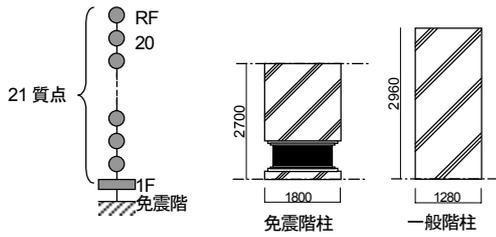


図-25 解析モデル

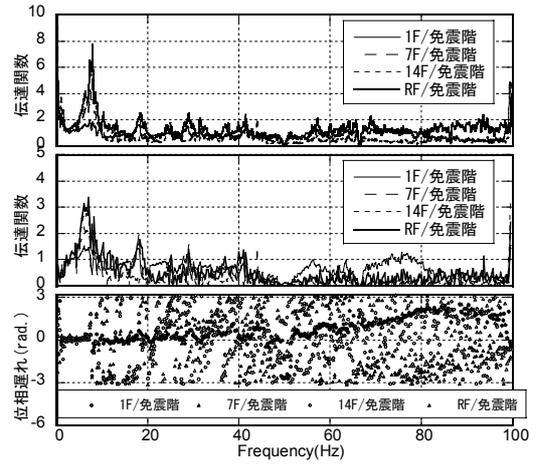
b) 各層間のレベル差

1F から 7F および 1F から 14F に至る鉄道振動の振動加速度レベル差を図-22 に示す。1F から 14F (伝搬距離 38.5m) のレベル差はおおよそ 5dB 程度となっており、1F から 7F (伝搬距離 17.8m) に至る場合もばらつきはあるもののほぼ同等である。次に、中心振動数 63Hz 帯域において各層間の振動加速度レベル差を測定間距離ごとにまとめたものを図-23 に示す。ただし、免震層や RF ではその構造から伝搬特性に差があると見られ、これらを分けて表示した。図中の回帰曲線は各々の伝搬経路について計算したものであり、各伝搬経路での距離減衰は似た傾向にあるがばらつきはかなり大きい。また、RF において振動加速度レベル差が逆に低下している傾向にある。これは押えコンクリート下の断熱層の影響、およびピックアップ周辺にあった建物造作物の風揺れによる影響などが考えられる。断熱層については断熱材のばね定数を $4 \times 10^7 \text{N/m}^3$ とすれば RF の押えコンクリート部分の固有振動数はおおよそ 74Hz となり、対象となる帯域に影響を及ぼしている可能性がある。

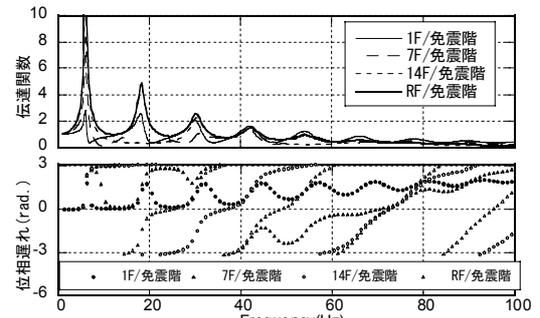
c) 加振方法による建物内振動伝搬

鉄道振動は建物入力時に基礎部分で建物を面加振していると仮定し、建物内の振動減衰を定性的に把握するため点加振による減衰性状との比較を行った。1F の測定点に近い共用廊下部分でハンマー加振し、その応答波形を測定した。使用したハンマーは PCB (086C20) である。

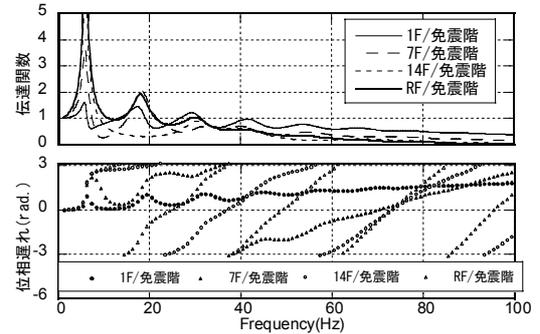
松田らによれば建物の構造体の一点が加振されたときの、建物内における振動加速度レベルの減衰は次式で表されるとしている⁴⁾。



(a) 実測値の伝達関数・位相遅れ (上:スペクトル比, 中・下:式(3))



(b) 解析による伝達関数・位相遅れ (h=0.05)



(c) 解析による伝達関数・位相遅れ (h=0.10)

図-26 実測値と解析値による伝達関数と位相遅れ

$$\Delta L = -N \log r - \alpha f^{1/2} r \quad (2)$$

ここに、 r は加振点から構造体を経て測定点に至る幾何学的に最短の距離、 α は媒質の内部損失による減衰、 N は振動の拡散減衰を表す定数である。

式(2)は点加振によるエネルギー減衰として検討されたものであるが、加振方法による建物内の伝搬性状に対しても有用であると考えた。鉄道振動の場合は面的に加振されているものと仮定し $N=0$ とした。ハンマー加振では 2~3 次元的な減衰が生じると考えられるため、 N の値は 10~20 の値を得るものと予測される。 α は 0.03 とした。それぞれの加振源に対する結果を図-24 に示す。ハンマー加振の場合においては $N=10 \sim 20$ の計算値の幅に収まり、鉄道加振

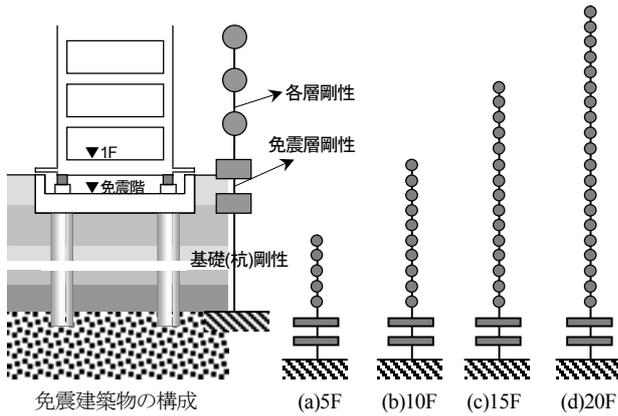


図-27 免震効果検証用解析モデル図

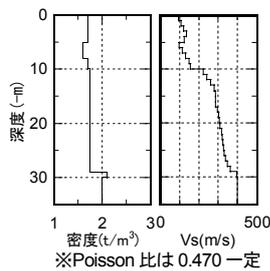


図-28 仮想地盤モデル

表-2 構造体の主な諸元

	5F	10F	15F	20F
柱 mm	□750	□800	□900	□1000
壁厚 mm	200	200	250	250
Fc N/mm ²	24	36	40	48
密度 N/mm ³	23.0	23.0	23.0	23.5
ヤガ率 N/mm ²	2.3E+4	2.4E+4	2.6E+4	3.0E+4
ゴム径 mm*	662	840	987	1,114
ゴム総高さ mm	200	200	200	200
杭径 mm	1300	1700	2000	2200

*面圧σ=10N/mm²のとき
 スパン：桁行7,000mm, 張間10,000mm
 階高：3,000mm, 杭長30,000mm
 単位面積質量：1.4t/m²

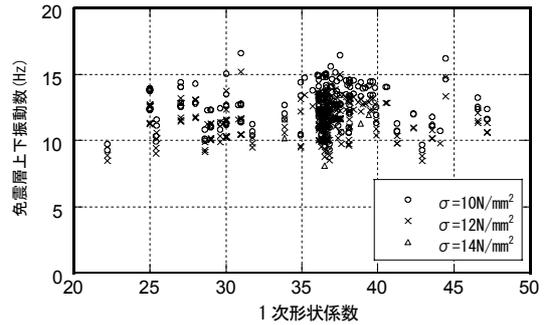


図-29 免震層上下振動数

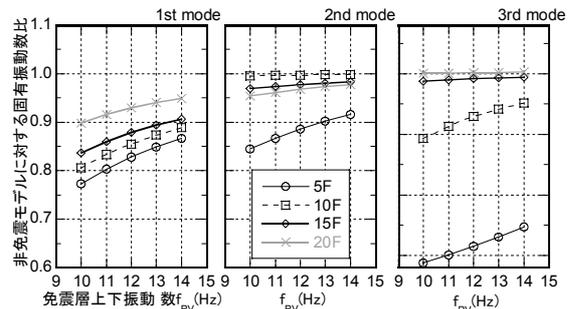


図-30 非免震モデルに対する固有振動数比

の場合はN=0, すなわち幾何減衰を無視した計算値と同様な傾向を示す。このことから、躯体内に入力された鉄道振動の減衰は、躯体の内部損失の比率が大きいと推察される。

d) 解析モデルによる減衰定数の推定

本測定で得られた結果に対して解析モデルによる減衰定数の推定を行う。図-25に解析モデルを示す。解析対象方向は鉛直方向とする。モデルは建物高さ方向に質点と鉛直ばねを直列に繋げた多質点系モデルであり、モデル化の範囲は測定点近傍の柱およびその周辺とした。各質点の質量は図面等から算定し、鉛直ばねは上部構造については柱および壁寸法、階高、その材料特性より、免震層については積層ゴムとその上下基礎の寸法および材料特性より算定した。減衰定数は上部構造 h=0.05 および h=0.10, 免震層は h=0.005 の各別一定減衰とした。

図-26にそれぞれ実測値と解析モデルから算定した伝達関数と位相角をそれぞれ示す。実測値から算定した伝達関数は、免震層に対する各測定点の Fourier スペクトル比(図-26(a) 上段)および式(3)(図-26(a) 中・下段)より算出した。

$$H(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|}{S_{xx}(\omega)} \quad (3)$$

ここに、H(ω)は伝達関数、S_{xy}(ω)はクロススペクトル、S_{xx}(ω)はパワースペクトルを表す。

伝達関数のピーク振動数は概ね整合しているが、ピーク形状は実測の方がやや尖鋭となっている。ピーク値は、Fourier スペクトル比による結果と減衰定数 h=0.05 の解析結果、また式(3)による結果は h=0.10 の解析結果と調和的である。このことから対象建物の上下動の減衰定数は h=0.05~0.10 程度であると考えられる。

4. 免震建物の上下動低減効果の解析的検討

(1) 質点系応答解析による検討

a) 解析モデル

以上の測定結果をふまえ、一般的な免震建物の上下振動低減効果の確認およびその定量化を目的とした多質点系上下動応答解析を行った。図-27に解析モデルを示す。解析モデルは板状建物を想定した上部構造-免震層-下部構造(杭基礎)からなる多質点系モデルである。鉛直剛性について、上部構造は試設計された柱・壁寸法およびRC造の材料特性より算出し、下部構造は杭径および仮想地盤の諸定数(図-28)等から Mindlin 解を用いて算出する。免震層の鉛直剛性は、積層ゴムの諸元から算定される鉛直剛性とその上下基礎の鉛直剛性の直列和とする。モデル化の際に使用したその他の主な諸元を表-2に示す。

解析パラメータは上部構造を剛体とみなしたときの上下振動数(以下、免震層上下振動数 f_{RV})および建物階数

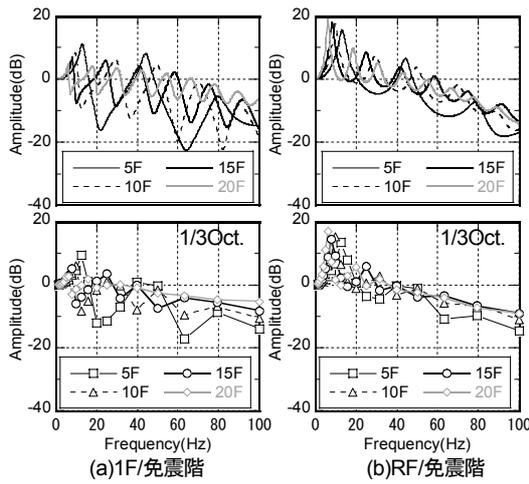


図-31 免震階に対する伝達関数[免震上下振動数 $f_{RV}=14\text{Hz}$]

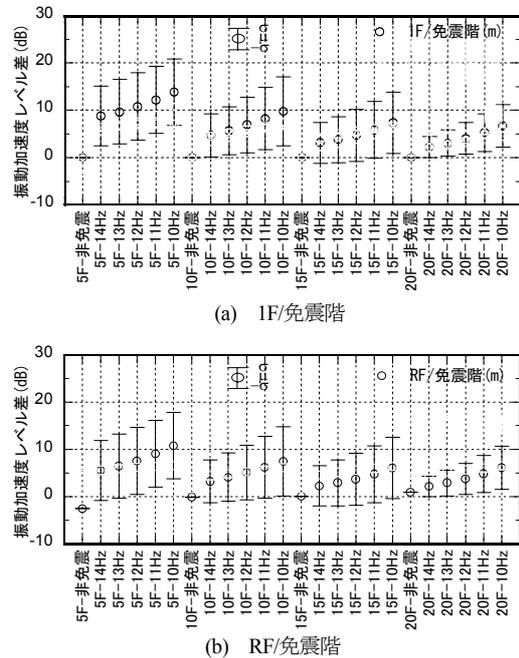
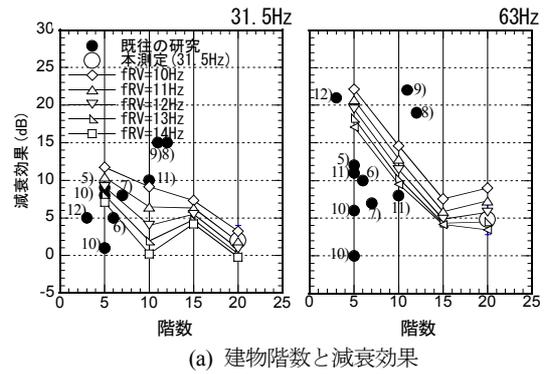


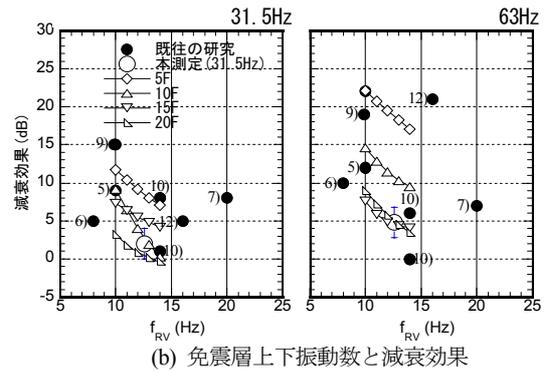
図-32 階数および免震層上下振動数に対する振動加速度レベル差

(5,10,15,20F)である。免震層上下振動数 f_{RV} は、免震構造において一般的な f_{RV} と考えられる $10\sim 14\text{Hz}$ (1Hz ピッチ)とする。これは積層ゴムの各メーカーの製品情報を参考に上部構造を剛体とみなしたときの面圧 σ を $10\sim 14\text{N/mm}^2$ と仮定した場合に算定された f_{RV} が図-29 に示すような範囲に存在することによる。また、比較のために免震層を剛体と仮定した非免震モデルを設定する。減衰の評価方法は、各部別一定減衰とし、上部構造については $h_B=0.05$ 、免震層 $h_R=0.005$ 、下部構造 $h_P=0.10$ とする。

図-30 に非免震モデルに対する免震モデルの 1~3 次固有振動数比を示す。1 次固有振動数比は建物階数が低いほど、 f_{RV} が低いほど小さくなっている。2,3 次固有振動数はややばらつきが大きくなっているが傾向はおおむね同様である。



(a) 建物階数と減衰効果



(b) 免震層上下振動数と減衰効果

図-33 免震層による減衰効果
(片括弧数値は参考文献番号)

b) 解析結果

i) 伝達関数

図-31 に免震階に対する 1F および RF の伝達関数[免震層上下振動数 $f_{RV}=14\text{Hz}$]を 1/3 オクターブバンド分析結果とあわせて示す。上部構造の高次モードの影響による伝達関数の凹凸が見られる。高次モードの影響によりその振動数帯域の応答が増加するため、特に鉄道振動に見られる数十 Hz の振動低減効果を確認する場合はこのような上部構造の高次モードの影響を反映する必要がある。1/3 オクターブバンドで評価すると、ばらつきはあるものの低層階の方がレベル差は大きくなっている様子が分かる。前述した測定対象建物と同じ 20F モデルの免震階に対する 1F の振動加速度レベル差は 40Hz 以上で 1~4dB 程度であり、本測定結果と調和的である。

ii) 免震層上下振動数と振動加速度レベル差

図-32 に免震層上下振動数 f_{RV} をパラメータとする免震階に対する 1F および RF の振動加速度レベル差の平均値と標準偏差($\pm\sigma$)について階数ごとに示す。ここでいう振動加速度レベル差の平均値とは振動数 20~100Hz の 1/3 オクターブバンド値の相加平均である。免震階に対する 1F の振動加速度レベル差は各階数とも f_{RV} が小さくなるに従い大きくなり、階数が高くなるに従い小さくなる。このことは f_{RV} が上部構造の上下振動数に対して相対的に小さくなるため、上下動に対する防振効果が顕著になると考えられる。また、階数が高くなると高次モードのピーク振動数

の繰返し間隔が短くなるため、 f_{RV} が大きくなるほど、また階数が高くなるほど1/3オクターブバンド値のばらつきが小さくなっている。なお、これらの傾向は免震階に対するRFの振動加速度レベル差についても同様に見られる。

iii) 階数、免震層上下振動数と免震層の低減効果の関係

図-33に前述の解析結果および本測定結果から得られた免震層の低減効果と建物階数および免震層上下振動数 f_{RV} の関係を中心振動数 31.5、63Hz の 1/3 オクターブバンドについて示す。また同図には既往の研究⁵⁾⁻¹²⁾に示された結果を示す。対象建物の f_{RV} (12.6Hz)は上部基礎を無質量と仮定して、測定結果のスペクトル比により算出した免震階および1Fに対する屋上階のピーク振動数を使用して算出した。建物階数と免震層の低減効果の関係では、解析結果により階数の増大に対して低減効果が小さくなる傾向が既往の研究結果および本測定結果により確認される。一方、免震層上下振動数 f_{RV} と免震層の低減効果の関係についても、 f_{RV} が大きくなるに従い低減効果が小さくなる傾向が確認される。なお、図-33(a)右図に見られるように解析結果は既往の研究結果と整合していない部分もあり、モデル化の設定については今後検討する必要がある。

5. まとめ

固体伝搬音の予測精度の向上、および免震構法による固体伝搬音の低減効果の把握を目的として、免震建物の振動測定結果およびその考察について報告した。主な結果を以下に示す。

①**地盤の振動伝搬特性**：鉄道軌道に近接した地盤における振動はほぼ Rayleigh 波が支配的であり、その減衰も幾何的である。波動の到来方向については 10Hz 程度の低振動数ではほぼ軌道に直交する方向と考えられるが、固体伝搬音において重要と考えられる 60Hz 付近では明確な方向を確認することはできなかった。

②**基礎の入力損失**：建物への入力損失は、おおむね 10dB 程度であり、理論式より小さい値であった。基礎各位置における測定点の位相遅れから見て基礎内の振動伝搬は支持地盤面の振動伝播特性と同様である。

③**免震層の振動低減効果**：免震層の固体音領域（31.5～100Hz 程度）における振動減衰効果は鉛直方向で 2～5dB 程度であり既往の研究⁵⁾⁻¹²⁾よりもその効果は小さかった。水平方向については上部構造の振動特性によりその効果に差が生じる。

④**建物内の波動伝搬**：鉄道振動のような外乱に対しては、建物が面的な加振を受けていると考えられる。また、建物内の振動伝搬特性は振動モードと内部損失に大きく影響される。

⑤**免震層の振動低減効果因子**：多質点系上下動応答解析の結果から、建物階数が低いほど、また免震層上下振動数が大きいほど免震層による振動低減効果は大きくなる。

謝辞：本研究を進めるに当たり名古屋大学：澤田義博教授、福井工業大学：野路利幸教授には大変貴重な御意見を賜りました。また本研究では工学院大学：久田嘉章教授が WEB 上で公開しているプログラムを使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，1977.
- 2) N. S. Neidell and M. T. Taner: Semblance and other coherency measures for multichannel data, GEOPHYSICS, Vol.36, No.3, pp.482-497, 1971.
- 3) 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社，1974.
- 4) 松田由利，橋秀樹，石井聖光：建物構造体中における固体音の伝搬性状，日本音響学会誌，35 卷 11 号，pp.609-615, 1979.
- 5) 阿部隆之，莊大作：免震構造による地下軌道からの固体音対策（集合住宅），音響技術，pp.16-19, 1996.
- 6) 中澤俊幸，山口昭一，蓮田常雄，藤井光次郎：地下鉄道近傍に立地する免震建物の振動伝搬特性（その 1）工事進捗に伴う振動伝搬の実態，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.241-242, 1998.
- 7) 綿谷重規，須賀昌昭，大井尚志，唐木卓哉：免震構造による地下鉄振動防止について，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.147-148, 2002.
- 8) 松岡明彦，渡辺秀夫，宮尾健一：免震構造の集合住宅における地下鉄からの固体伝搬低減効果について，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.275-276, 1999.
- 9) 松岡明彦，渡辺秀夫，宮尾健一，土屋祐造：鉄道振動に対する免震構造集合住宅の固体音低減，日本音響学会講演論文集，pp.873-874, 1999.
- 10) 濱口雅義，武居泰，蓮田常雄，増子友介，藤井光次郎，柴田昭彦：地平および地下鉄道に近接する建物の振動伝搬特性—（その 2）免震建物の工事進捗に伴う振動伝搬の実態—，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.271-272, 1999.
- 11) 近藤誠一，大脇雅直：鉄道近接免震集合住宅への固体音の伝搬に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.239-240, 1998.
- 12) 戸松征夫，渡邊秀夫，飯塚信一，松岡明彦，佐々木亮治，土屋裕造，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，pp.239-240, 1998.