

地下鉄振動を受ける壁式構造の建物内振動伝搬特性に関する研究

Study of the Vibration Propagation of RC Wall Structure excited by Subway

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

地下鉄軌道直上にある壁式構造の建物の振動測定を行った。測定結果から上部構造の1次固有振動数である55Hz付近の伝達関数が支配的であった。また、スラブの振動系を付加した質点系解析モデルにより算定した伝達関数は測定結果とほぼ同様であり、質点系モデルを用いた場合でも建物各部位の振動系を適切に考慮すれば、建物の実挙動が適切に表現されることが分かった。また、固体伝搬音の対策工法として、同調質量ダンパーによる建物上下振動の低減効果に関する解析的検討を行い、同ダンパーが建物の振動低減に効果的であることが分かった。

キーワード：地下鉄振動，壁式構造，固体伝搬音，伝達関数，質点系モデル，同調質量ダンパー

Vibration measurements of the RC wall structure just above the subway tracks were carried out. From the measurement results the transfer function at around 55 Hz, which was the first mode frequency of the structure, was predominant. The estimated transfer functions from a mass model analysis considering the slab vibration systems were coincident with the observed ones. Therefore, the mass model analysis could simulate the real behavior of the structure if the vibration systems of the each structural part was evaluated adequately. Also analytical studies were conducted to investigate the efficiency of vibration reduction using the tuned mass damper system for the structure born sound. The results showed the effectiveness of these dampers.

Key Words: Excitation by Underground Pass, Wall Structure, Structure Born Sound, Transfer Function, Mass System, Tuned Mass Damper

1. はじめに

近年の都市部における交通網の発達により、鉄道軌道近傍の建物における固体伝搬音（以下、固体音）の評価およびその対策が重要な課題となってきた。特に、固体音に対して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、事前に適切な対策を施すことが重要となる。一方、固体音の低減対策として積層ゴムを利用した免震構造の有効性に関するいくつかの報告もある。

これらを背景として既報1)では、固体音の予測と固体音低減に対する免震構法の有効性の確認を目的として、鉄道軌道（高架軌道）近傍に建つ免震建物および周辺地盤における波動伝搬特性や基礎による入力損失、などを実測により確認した。また既報2)では、地下鉄走行に伴う振動に着目し、固体音の予測精度の向上を目的として3棟の建物で行った振動測定の結果について報告するとともに、建物振

動伝搬特性について解析による評価の可能性を確認することを目的として、多質点系応答解析による測定結果の検証を行った。また、それら3棟の建物のうち1棟は免震構法を採用した建物であり、免震構法による固体音低減効果についても確認した。これらの実測等の結果から明らかになったことは、鉄道通過時における振動の位相遅れは各振動数に対してほぼ同一であり、地下鉄走行に伴う加振源はラインソースと看做することができると思われること、各周波数成分の位相速度を計算すると高架橋を通過する鉄道および地上付近を通過する地下鉄から発生される波動は表面波が主であるが、地表から比較的深い位置を通過する地下鉄から発生される波動は実体波が主であること、建物全体および各部の振動特性を適切に評価した質点系モデルは、高周波数領域においても伝搬特性を評価できる可能性があること、等である。しかし、このような鉄道振動に関する測定事例が少ないことや実用的で精度の高い波

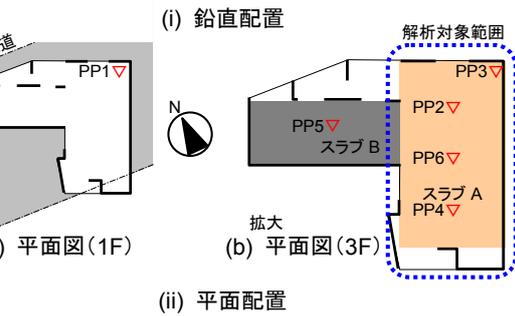
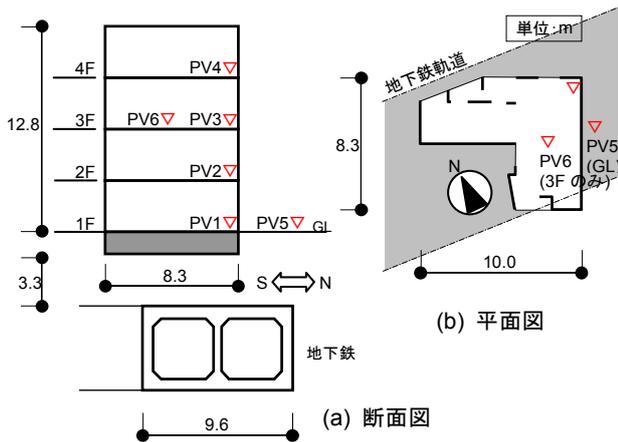


図-1 対象建物と地下鉄に関する概要図
(▽:ピックアップ設置位置)

動伝搬の予測法が確立していないことなど、固体音予測を行ううえでの技術的課題が多く残されている。

本研究では、地下鉄軌道直上に建つ壁式構造の建物の振動測定を行う機会を得たので、対象建物の振動特性の把握と、建物内振動伝搬特性を説明する解析モデルの妥当性を把握することを目的として、得られた振動測定結果および解析結果について報告する。また、これらの解析結果から上下動に対する建物の振動伝搬特性はスラブの撓み振動など建物各部位の振動の影響が大きいことが分かった。ここでは、そのような振動特性を利用した固体音低減対策の一方法として同調質量ダンパーの設置を考え、固体音が問題となる振動数領域の振動低減効果について解析的な検討を行った。

2. 建物および測定概要

図-1 に対象建物と地下鉄函体の位置関係を示す。基礎下端から 3.3m 深さの位置に函体の天端がある。対象建物は平面が約 10m×8m の L 字形をした 4 階建の共同住宅である。構造種別は RC 造、構造形式は壁式、基礎は直接基礎である。固体音対策として基礎直下に厚さ 50mm の防振用のゴムシートを基礎全面に敷いている。上棟直後であり、測定時には仕上・設備等はない状態であった。測定には周波数範囲が DC～100Hz である 1 成分加速度計

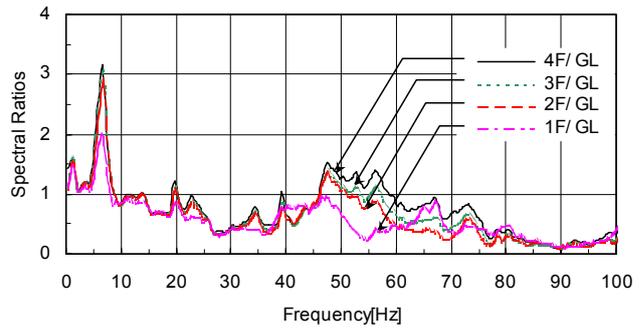


図-2 GL に対する各階のスペクトル比

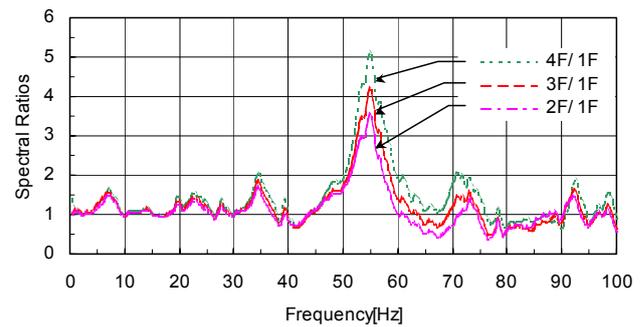


図-3 1F に対する各階のスペクトル比

(VM-5122, IMV(株製))を 6 台使用した。また、図-1 にはピックアップ(以下、PU)の配置状況を示している。PU の配置は建物の鉛直方向の振動特性とスラブの振動特性を把握するために鉛直配置と平面配置とした。鉛直配置(図-1 (i))は図中位置 PV5,PV6 を除いてスラブ振動の影響の少ない壁の入隅部に設置した。平面配置は図-1 (ii) (b) に示すように、便宜上右側の長方形部分をスラブ A、左側の長方形部分をスラブ B と称すると、スラブ A の長辺方向に 3ヶ所(四分位置)、スラブ B の中央に 1ヶ所 PU を設置した。なお、データはサンプリング周波数 1kHz、A/D は 16bit で収録した。また、データ処理は地下鉄の通過時間約 10～15 秒間を含めた約 16 秒間で Fourier スペクトル(バンド幅 0.5Hz の Parzen ウィンドウによる平滑処理を実施)を計算し、各点間のスペクトル比を計算した後、相加平均した。

3. 測定結果

(1) 鉛直配置による結果

図-2 に鉛直配置における GL に対する各階のスペクトル比を示す。6Hz 付近に尖鋭なピークが、また 50～60Hz 付近に振幅は小さいが幅の広いピークが見られる。これらのピークを除くと 10Hz 付近から高振動数になるにつれて徐々にスペクトル比が低減している。図-3 に鉛直配置に

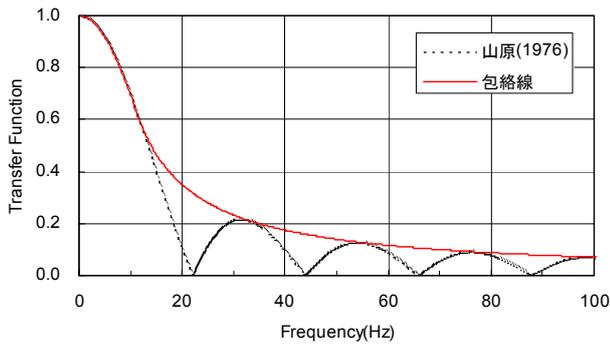


図-4 基礎の入力損失

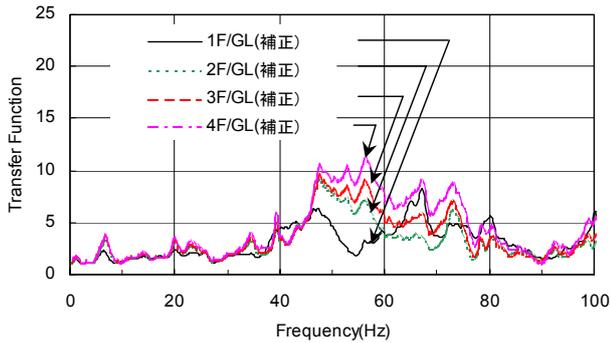


図-5 入力損失効果を考慮した伝達関数

おける 1F に対する各階のスペクトル比を示す。図-2 で見られる 6Hz 付近のピークは 1F に対する 2F, 3F, 4F とも、ほぼ同値の 1.5 程度と小さくなっている。35, 55, 70, 92Hz 付近にピークが見られるが、中でも 55Hz 付近のピークは他のピークと比べて最も大きい。この 55Hz 付近のピークは階数が高くなるにしたがい振幅も大きくなっている。一方、図-2 では GL に対する 1F のスペクトル比においてディップを生じている。また、55Hz より低振動数側で顕著なピークが見られない。これらのことから、55Hz 付近の振動数が上部構造の 1 次固有振動数であると推定される。

本建物は振動対策として基礎下全面に防振用ゴムシートを敷いている。この対策方法の効果について考察する。慣性の相互作用のみを考慮するために基礎の入力損失を除去することを考える。基礎の入力損失は本測定方法では測定することはできないため山原³⁾により評価する。山原による方法は特定振動数に落ち込みが生じるが、実測ではこのような顕著な落ち込みは観察されないことが多いので、図-4 に示すような包絡線で評価する。図-2 における GL に対して図-4 の入力損失効果を除去した伝達関数を図-5 に示す。定量的な評価は難しいが、50~60Hz 付近の波動はそれ程遮断されていないと考えられる。一般的にこのような遮断効果は 1 次元ばねによる質点系モデルによる共振曲線で説明されることが多い。もし、質点系モデルで模擬できるのであれば高振動数領域における遮断効果が顕著に現れるはずであるが、実測結果ではそのような結果

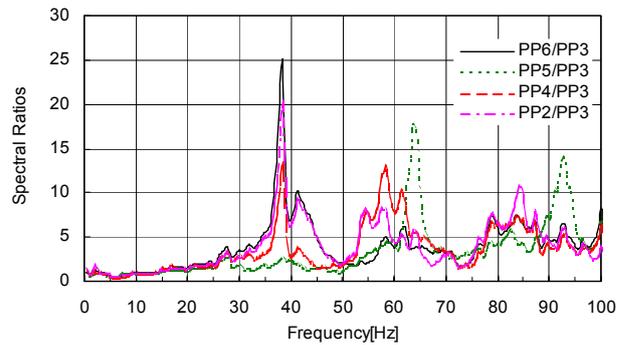


図-6 入隅部(PP3)に対するスラブ各位置のスペクトル比

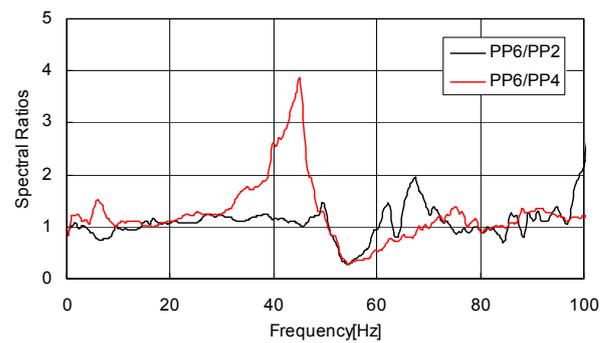


図-7 スラブ中央(PP6)の四分位置(PP2,PP4)に対する比

は確認されない。すなわち、1 次元ばねで防振用ゴムシートをモデル化する場合に、実状に即した設定をする必要がある。ちなみに、防振効果を波動インピーダンスから波動の低減率を評価している例が見られるが、多くが半無限地盤の波動場を仮定したものであるため、遮断効果を推定する場合に注意が必要である。

(2) 平面配置による結果

図-6 に平面配置における 3F 入隅部に対するスラブ各位置のスペクトル比を示す。PP3 に対する PP2, PP4, PP6 において 38Hz 付近にピークが見られる。これらのピークのうち PP6 が最も大きくなっていることから、約 38Hz がスラブ A の 1 次モードと思われる。また、約 58Hz では PP2, PP4 にピークが見られるが PP6 には顕著なピークが見られないことから、この振動数付近はスラブ A 中央部を節とする 2 次モードが卓越しているものと思われる。84Hz 付近のピークは PP2, PP4, PP6 すべてに見られ、振動数の大きさからスラブ A の 3 次モードであると推定される。一方、約 63Hz では PP5 に顕著なピークが見られるが、他の位置ではピークが見られないことから、この振動数付近はスラブ B の 1 次モードが卓越しているものと思われる。92Hz 付近は PP5 のみが顕著なピークを示していることからスラブ B の 2 次モードであると推定される。

図-7 に PP6 に対する PP2 および PP4 のスペクトル比を示す。45Hz 付近では PP6/PP4 が鋭いピークを有してい

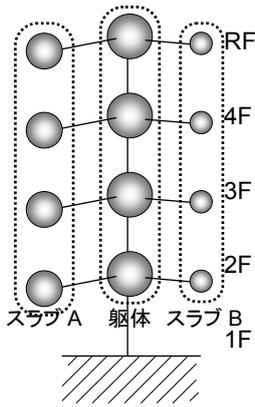


図-8 解析モデル

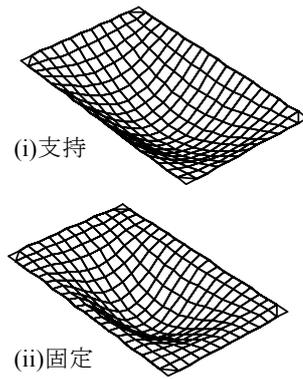


図-9 スラブの1次振動モード

表-1 スラブのモード振動数

	mode	支持 (Hz)	固定 (Hz)	平均値 (Hz)
スラブ A	1 st	26.3	51.6	39.0
	2 nd	44.7	70.5	57.6
	3 rd	75.3	103.5	89.4
スラブ B	1 st	44.0	87.4	65.7
	2 nd	71.4	114.6	93.0
	3 rd	117.0	162.8	139.9

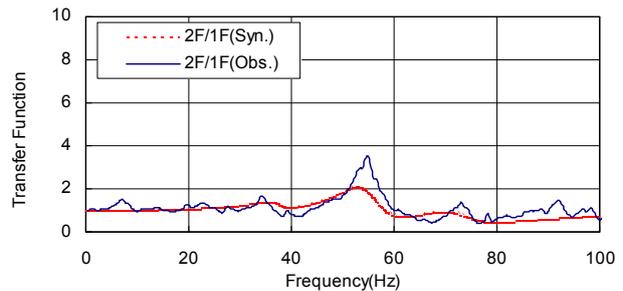
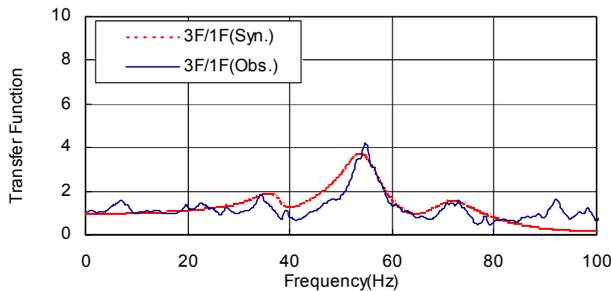
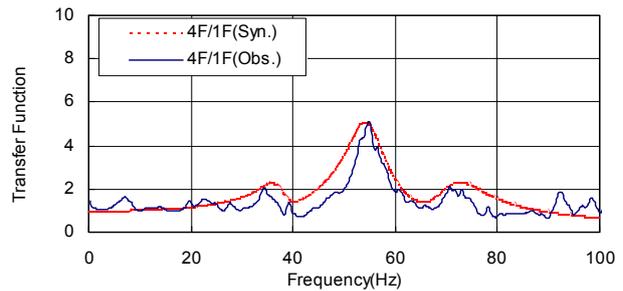
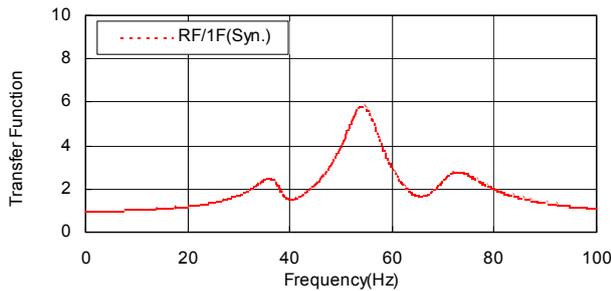


図-10 1F に対する各階の伝達関数(解析と実測との比較)

るが PP6/PP2 はほとんどピークが見られない。すなわち PP6 と PP2 がほぼ同様の振幅で振動していることを意味している。これは PP2 付近のスラブは北側に大きな開口部が存在し、スラブ端の拘束効果を受けていないためと考えられる。一方、PP4 は3辺がほとんど壁に覆われているため端部の拘束効果の影響で PP4 の振動が制限されており、このような状況が発生したものと思われる。また 55Hz 付近ではスペクトルに凹部が見られる。すなわち、PP6 が PP2,PP4 より小さな振幅になっている。これはスラブ A の2次モードが卓越しており、PP6 付近がモードの節となっているためと考えられる。

4. 質点系モデルによる測定結果の検証

上部構造の振動伝搬性状は、建物を適切な質点系モデルに置換することにより解析的に評価することが可能である^{1),2)}。ここでは質点系モデルによる測定結果の検証を行う。解析モデルを図-8に示す。解析モデルは1F床を固定

とした質点系モデルである。モデル化に当たり図-1の点線範囲を解析対象とした。各階重量は点線で囲まれた範囲の各階のスラブおよび壁の体積に材料の密度(2.4t/m³)を乗じて算定し、各階剛性は点線で囲まれた範囲の壁(200mm厚)の材料数量をすべて算出し EA/h (E; ヤング率, A; 断面積, h; 階高)で評価した。ヤング率はコンクリートの評価式⁴⁾、鉄筋のヤング率比を10、設計基準強度に対する圧縮強度の比の平均値1.31⁵⁾から算定した。スラブ A, B に対して図-9のような周辺支持、固定の各条件における1次固有振動数の平均値とした(表-1)。スラブ厚は200mmである。減衰定数は一定減衰として h=0.07 とした。図-10に1Fに対する各階の伝達関数を実測結果と合わせて示す。RFはピックアップを設置していないため解析値のみを示す。これらの図からピーク振動数と振幅が比較的良好に一致していることが分かる。すなわち、55Hz 付近のピークは解析的にも建物の1次固有振動数であることが証明され、40Hz および 65Hz 付近のディップもスラブ A およびスラブ B の1次モードに対して生じたものと推定さ

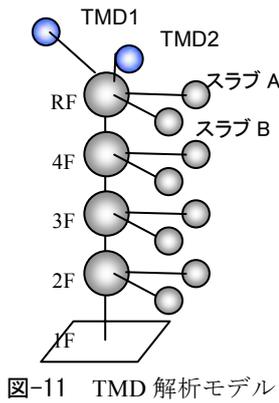


表-2 解析パラメータ

ケース名	基数	質量比	TMD 振動数
CASE1	1	0.01,0.02, 0.05,0.10	$f_{D1}=55\text{Hz}$
CASE2	2	同上	$f_{D1}=55\text{Hz}$, $f_{D2}=45\text{Hz}$ となるよう調整
CASE3	3	同上	$f_{D1}=55\text{Hz}$, $f_{D2}=45\text{Hz}$, $f_{D3}=35\text{Hz}$ となるよう調整

図-11 TMD 解析モデル

れる。壁式構造であっても上述した方法でモデル化を行えば建物挙動を適切に模擬できることが分かった。

5. 同調質量ダンパーによる振動低減効果

鉄道走行に伴う固体伝搬音低減の対策として、振動源の振動レベルを小さくする方法、基礎に対する入力を低減する方法などがある。本論の対象建物は、後者の基礎に対する入力の低減を目的として防振ゴムシートが敷かれている。一方、建物内における振動伝搬を低減する方法も固体音対策として考えられる。これまでの研究から上下動に対する建物振動特性はスラブなどの建物各部位の振動特性が影響を及ぼしていることが明らかとなった。ここでは、このような振動特性を応用した同調質量ダンパー（以下、TMD）による振動低減効果を解析により確認する。

(1) 解析モデル

図-11に解析モデルを示す。建物モデルについては、4.で検討した12質点系の解析モデルとし、TMDは建物頂部に最大3個まで配置したモデルとした。解析方向は上下動のみとする。

解析パラメータは、TMDの基数、質量比および剛性である。ダンパーの基数を1,2,3としたものをそれぞれCASE1, CASE2, CASE3とする。複数設置したTMDの固有振動数 f_{Di} はそれぞれ異なるものとし、CASE1では建物の1次固有振動数にほぼ同調するように $f_{D1}=55\text{Hz}$ とし、CASE2ではCASE1と同様に $f_{D1}=55\text{Hz}$ のTMDと低振動数側に移動するものと考えられるピークを低減する目的で $f_{D2}=45\text{Hz}$ のTMDを設置したモデルとする。さらにCASE3では同様の目的からさらに $f_{D3}=35\text{Hz}$ のダンパーを設置したモデルとする。質量比は建物全体の質量に対するTMD総質量の比で表現し、4個の質量比(0.01, 0.02, 0.05, 0.10)とする。減衰定数は建物のモデルと同様、すべてのモードに対して $h=0.07$ とする。表-2にこれらのパラメータについて整理して示す。

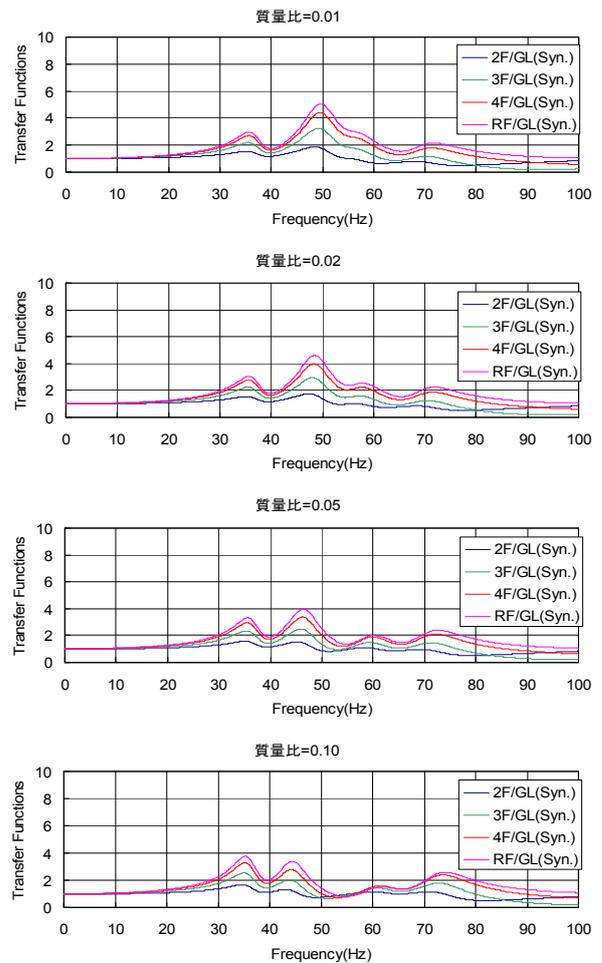


図-12 CASE1による伝達関数

(2) 解析結果

図-12にCASE1の解析結果を示す。質量比を大きくすると伝達関数が低減する。また、質量比が0.10になると建物の1次固有振動数付近である55Hz付近の伝達関数が各階とも1程度となり、TMDを設置しないとき(図-10)と比べると、RFにおいては6倍程度低減される結果となった。また、質量比が大きくなるとピークが低振動数側と高振動数側に推移している様子が分かる。ただし、これらのピークの振幅はそれ程大きくない。図-13,14にCASE2およびCASE3の解析結果を示す。これらの解析ケースもCASE1と同様の結果となっているが、CASE1よりCASE2とCASE3のほうが伝達関数の凹凸が低減されている。また、CASE2とCASE3とでは伝達関数の形に顕著な差は見られない。これは振動数の異なる複数のTMDが伝達関数のピークの出方を抑えているためである。ただし、55Hz付近だけで評価するならば、CASE2, CASE3よりもCASE1のほうが低減効果が大きい。

これらのことより、TMDを設置することにより伝達関数を低減させることが理論上は可能であると考えられる。

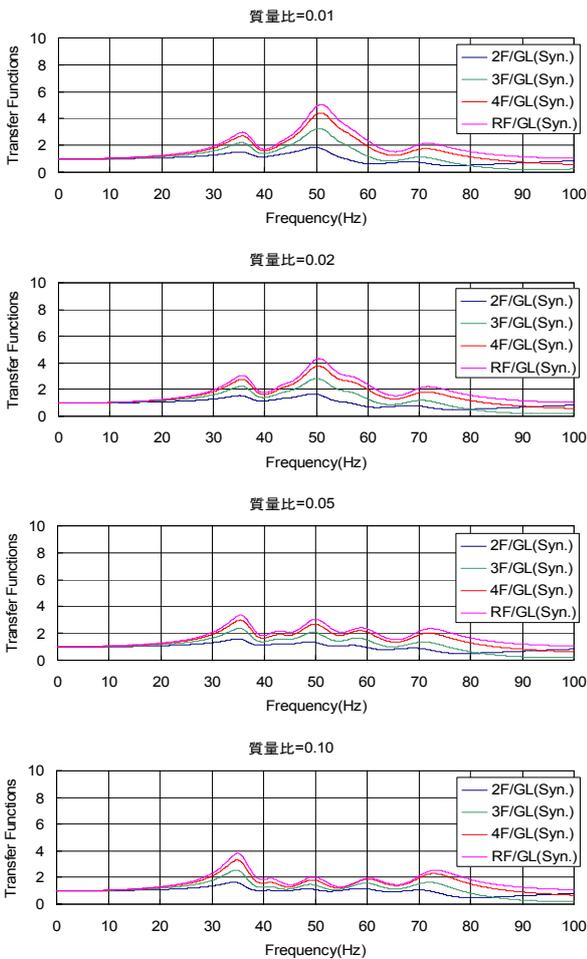


図-13 CASE2 による伝達関数

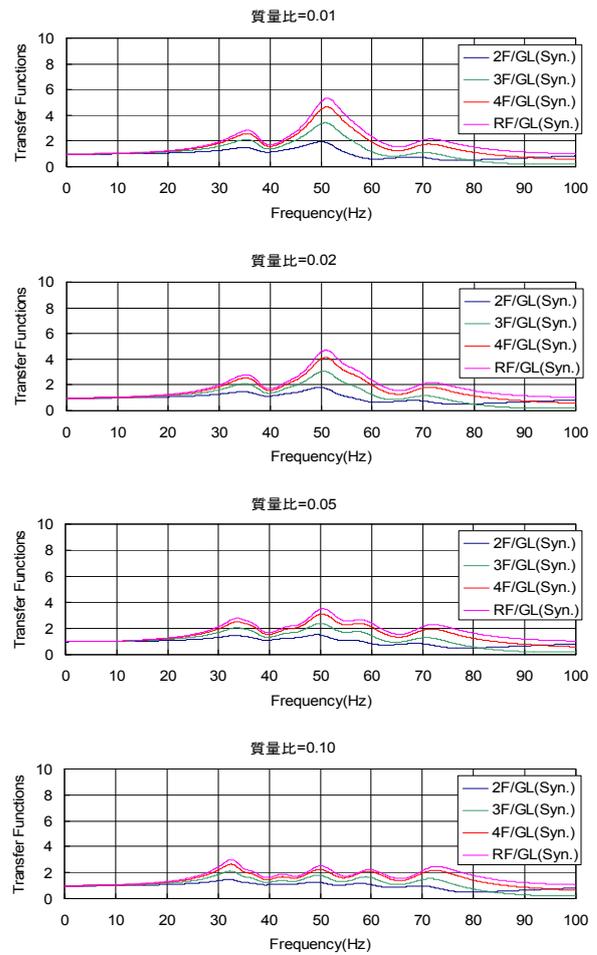


図-14 CASE3 による伝達関数

また、実際はスラブ等の存在により上下方向の伝達関数は複雑であるが、複数の TMD のチューニングを行うと広帯域で伝達関数を低減させることができると考えられる。さらに、TMD の質量比を大きくするとその効果は大きくなる。ただし、TMD の質量を大きくすると建物自重が大きくなるなど他の技術的課題が発生する。

6. まとめ

本研究では、地下鉄軌道直上に建つ壁式構造の建物の振動測定結果を報告するとともに、振動伝搬特性を推定するための解析的検討、および TMD を利用した上下振動低減効果の解析的検討について示した。それらの結果について以下に示す。

- ①対象建物の 1 次固有振動数は 55Hz 程度であること、スラブ等の建物部位の影響により伝達関数が複雑になるが、適切な解析モデルによりその伝達関数を模擬できる。
- ②建物側の対策として TMD を設置することにより、建

物上下振動が低減することが解析的に確認された。

謝辞: 本研究をまとめるに当たり、名古屋大学澤田義博教授、福井工業大学野路利幸教授から貴重なご意見を頂きました。また、建築技術部池原誠一氏、東京支店西関正明氏には測定に当たり多大なご協力を得ました。記してここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 山岸邦彰ほか: 鉄道軌道に近接する免震建物の振動伝搬特性, 三井住友建設技術研究所報告 Vol.2, 2004.
- 2) 山岸邦彰ほか: 地下鉄振動の地盤・建物内振動伝搬特性に関する研究, 三井住友建設技術研究所報告 Vol.3, 2005.
- 3) 山原浩: 環境保全のための防振設計, 彰国社, 1976.
- 4) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 丸善, 1999.
- 5) 坂巻健太ほか: 既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, p.801-802, 2001.