

# 地下鉄振動の地盤・建物内振動伝搬特性に関する研究

## Vibration Propagation within Ground and Structures adjacent to Subways

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

建物における固体伝搬音の予測精度向上を目的として、地下鉄軌道近傍に建つ3棟の建物の振動測定を行った。測定結果から、地下鉄通過中の加振源特性はラインソースと看做せること、建物と地下鉄軌道の相対的位置により基礎の入力損失の傾向が異なること、建物内振動の減衰は少ないことなどが分かった。また、多質点系応答解析により建物内の振動伝搬特性を模擬できる可能性のあることが分かった。

キーワード：振動伝搬、固体伝搬音、地下鉄、入力損失、多質点系応答解析

In order to improve the prediction capability of structure born sound in buildings, vibration measurements on three buildings located near to subway tracks were carried out. The results showed that an operating subway was considered to be a line source for vibration. The input loss in the building foundations was affected by the relative position of the building to the subway tracks. The vibration reduction within buildings was generally small. The results also demonstrated that numerical analyses of the MDOF system could explain the vibration propagation characteristics within a building.

**Key Words:** Vibration Propagation, Structure Born Sound, Subway, Input Loss, MDOF System Analysis

### 1. はじめに

居住性能の向上に対する要求が高まる傾向にある中で、それらの要求に応えられる技術が求められている。地下鉄走行に伴い発生する固体伝搬音（以下、固体音）の低減もそのような要求の一つである。近年の顕著な傾向である居住の都心回帰、さらなる地下鉄網の整備などにより固体音が問題となる場面が増加してきており、固体音対策が重要な技術的課題となってきた。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。

前報<sup>1)</sup>では、固体音の予測と免震構法の固体音低減に対する有効性の確認を目的として、実測を通じて鉄道軌道（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、などの傾向を見た。本報では、地下鉄走行に伴う振動に着目し、固体伝搬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、建物内の

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3棟の建物のうち1建物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確認する。

### 2. 対象建物および測定概要

表-1 に測定対象建物と特性把握のための測定項目を示す。建物用途は、建物 A, B は共同住宅であり、建物 C は事務所である。敷地や建物の制約から建物 C については地盤の振動伝搬および入力損失の各特性を把握するための測定をしていない。

表-1 対象建物と特性把握のための測定項目

対象建物	用途	特性把握のための測定項目		
		地盤波動伝搬	入力損失	建物波動伝搬
A	共同住宅	○	○	○
B	共同住宅	○	○	○
C	事務所	—	—	○

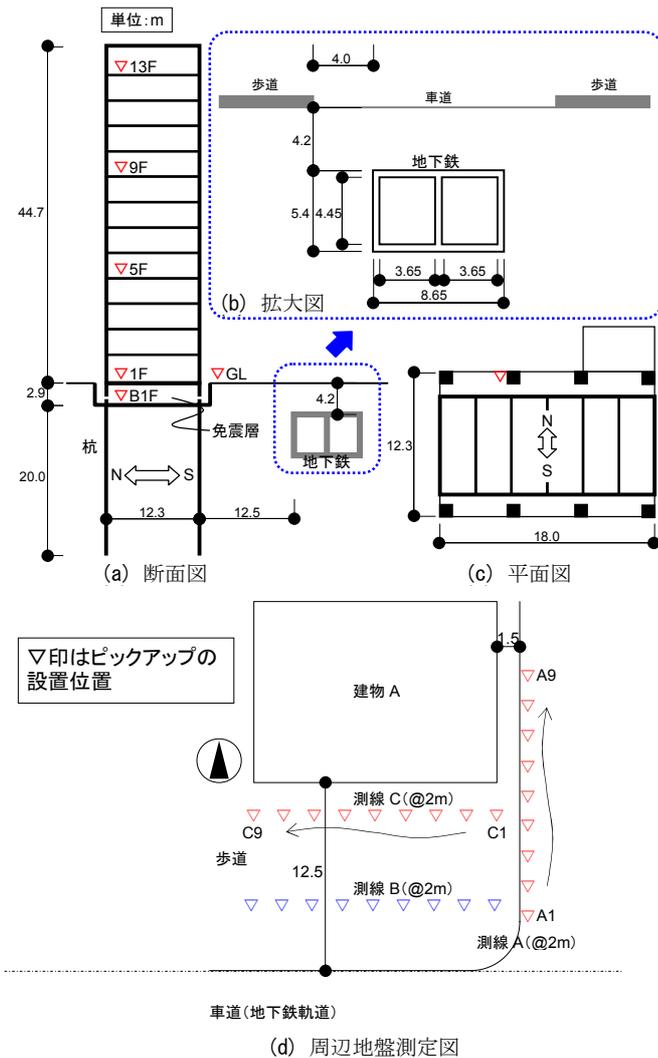


図-1 建物 A および周辺地盤と地下鉄に関する概要図

(1) 建物 A における振動測定結果

a) 測定概要

図-1 に建物 A および周辺地盤と地下鉄に関する概要図を示す。建物から水平に 12.5m、道路面から 4.2m の深さの位置に函体がある。函体は、高さ 5.4m、幅 8.65m、厚さ 0.45m の断面形状を有する 2 連のケーソンである。建物は約 18m×12m (3×1 スパン) のほぼ長方形をした 13 階建の共同住宅である。構造種別は免震構法 (天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー+鉛ダンパー) を採用した RC 造であり、基礎は杭基礎である。測定には周波数範囲が 2~100Hz である 3 成分加速度計 (JEP-6A3, ㈱アカシ製) を用いた。同図にピックアップの配置を示す。ピックアップはスラブや梁の振動の影響が少なくなるように柱または免震部材の近傍に設置した。ピックアップの設置位置は他の 2 建物についても同様である。データはサンプリング周波数 500Hz, A/D 変換は 16bit で収録した。なお、地上道路は片側 2 車線の比較的交通量の多い幹線

表-2 建物 A 付近の推定された S 波速度構造

層番号	深度 (m)	層厚 (m)	S 波速度 (m/s)
1	-0.92	0.92	175
2	-1.94	1.02	266
3	-2.88	0.94	118
4	-5.62	2.74	177
5	-10.57	4.95	254
6	-18.03	7.46	423
7	—	—	850

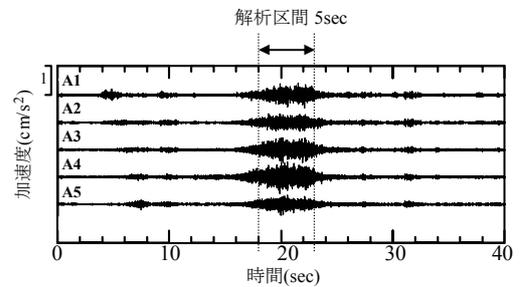


図-2 地下鉄の地盤振動波形例(建物 A;UD 成分)

道路であるが、自動車走行によるノイズの少ないデータがいくつか得られた。本報ではそれらのデータについてのみ分析を行った。

b) 地盤構造調査結果

本測定地点において表面波探査法 (SWS 法) を用いた地盤構造調査を実施した。表面波探査法とは、地表を打撃して発生する Rayleigh 波を、直線上に並べたピックアップで測定し、Rayleigh 波分散特性を満足する S 波の速度構造をインバージョン解析により推定する地盤調査法である。表面波探査は測線 B で行った。表-2 に SWS 法による S 波速度構造の推定結果を示す。建物 A の周辺地盤の S 波速度分布は、深さ GL-10.57m までは 118~266m/s の比較的遅い層で構成されているが、それ以深では 400m/s 以上の比較的速い層となっている。

c) 地盤の波動伝搬特性

地盤振動の測定は、地下鉄走行方向に対して直交 (測線 A) および平行 (測線 C) となる 2 測線で実施した。

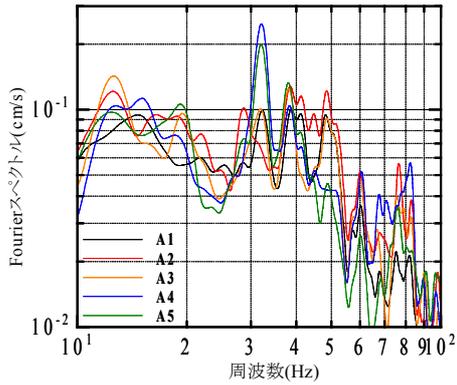


図-3 測線 A (A1~A5) における Fourier スペクトル

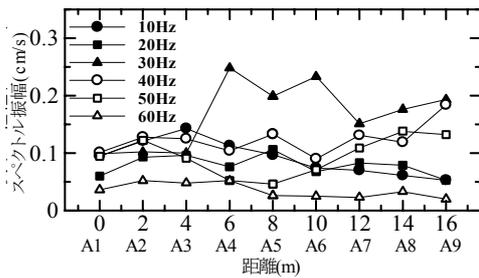


図-4 測線 A の距離減衰特性(建物 A)

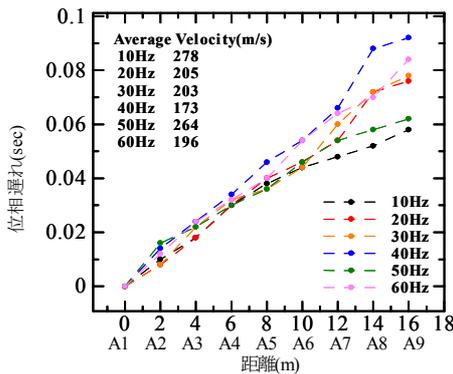


図-5 測線 A の各周波数における走時曲線(建物 A)

測線 A における測定波形例を図-2 に示す。図に見られるように地下鉄走行に伴う振動は、継続時間が 10 秒以下の紡錘形を示す部分である。以下の検討 (他の建物を含む) においてはこの紡錘形部分の UD 成分について解析的検討を行うこととする。

図-3 に測線 A の A1~A5 における Fourier スペクトル (波形の紡錘形部分の 5 秒間) を示す。Fourier スペクトルはバンド幅 3Hz で平滑化処理を行っている。13, 32, 38, 48, 60Hz 付近にスペクトルのピークが見られる。図-4 に 10~60Hz (@10Hz) の周波数におけるスペクトル振幅の距離減衰特性を示す。距離が遠くなるに従いスペクトル振幅が低減する周波数成分も見られるが、測定位置や周波数によりばらつきが見られ、顕著な距離減衰は見られない。

図-5 に各ピーク周波数を中心周波数とする狭帯域パ

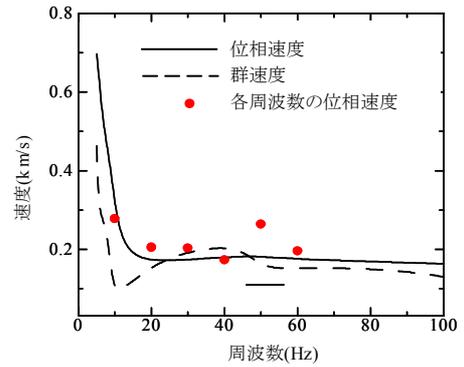


図-6 実測による位相速度と理論 Rayleigh 波分散曲線

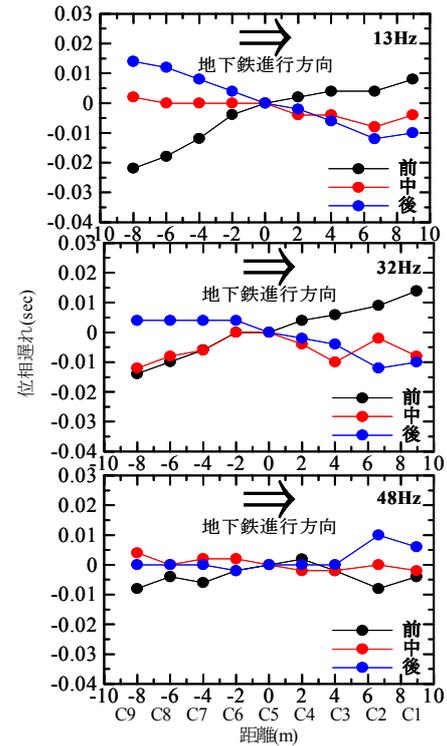


図-7 測線 C における位相遅れ(建物 A)

ンドパスフィルターを施した波形から求めた走時曲線、図-6 にこの走時曲線の近似直線から求めた各周波数成分の位相速度 (プロット) と表-2 に示した S 波速度構造に基づく理論 Rayleigh 波分散曲線 (実線: 位相速度, 点線: 群速度) をそれぞれ示す。測定から求めた位相速度は Rayleigh 波分散曲線に調和的であるとともに、地下鉄振動の卓越する周波数帯域では位相速度に顕著な差が見られないことが分かる。

次に、地下鉄走行と波動の位相特性の関係を調べるため、地下鉄に平行な測線 (測線 C) において観測された波形の紡錘形の中心部分の時刻 (中), その前の時刻 (前) およびその後の時刻 (後) に着目し、各測点における波動の位相遅れを求めた。図-7 に中心周波数 13, 32, 48Hz の測線 C における位相遅れを示す。13, 32Hz においては時刻 (前) および時刻 (後) では地下鉄の進行方向と測

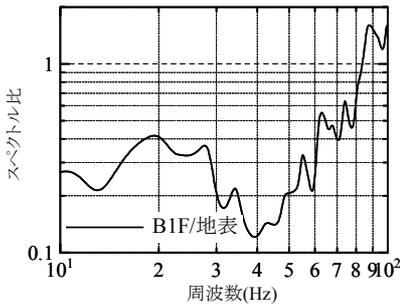


図-8 Fourier スペクトル比(建物 A; B1F/地表)

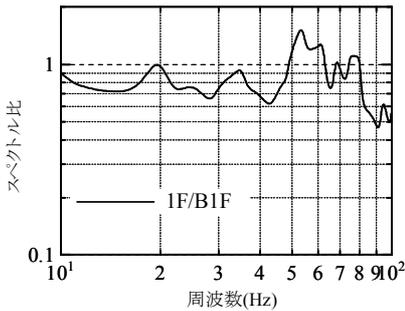


図-9 Fourier スペクトル比(建物 A; 1F/B1F)

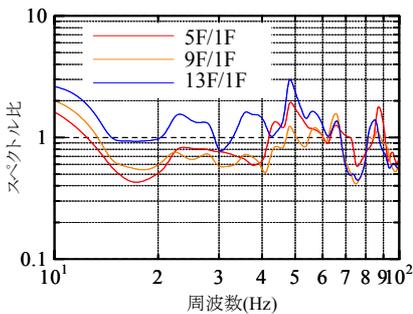


図-10 Fourier スペクトル比(建物 A; 各階/1F)

点の位置関係に起因すると見られる位相遅れが生じているが、時刻(中)ではややばらつきはあるものの顕著な位相遅れは見られない。ただし 48Hz の比較的高振動数になると時刻(前),(中),(後)のいずれにおいても明確な位相遅れが確認されなかった。以上のことから、少なくとも地下鉄が至近距離を通過中に発生する波動は近似的に平面波として扱ってもよいことが推察される。

d) 基礎の入力損失特性

図-8に地表面に対する基礎の Fourier スペクトル比(以下、スペクトル比)を示す。スペクトル比は同一条件で測定されたデータから算定した Fourier スペクトル比のアンサンブル平均とした。10Hz 付近で 0.3 程度、40Hz 付近で最小値を示し、これより高周波数側では再び 1 に近づく。一般に、基礎内においては幾何学的相互作用により周波数が大きくなるとともに振動が低減することは良く知られている。図-8においても 40Hz 程度までは同様の傾向が見られる。ただし、高周波数側でスペクトル

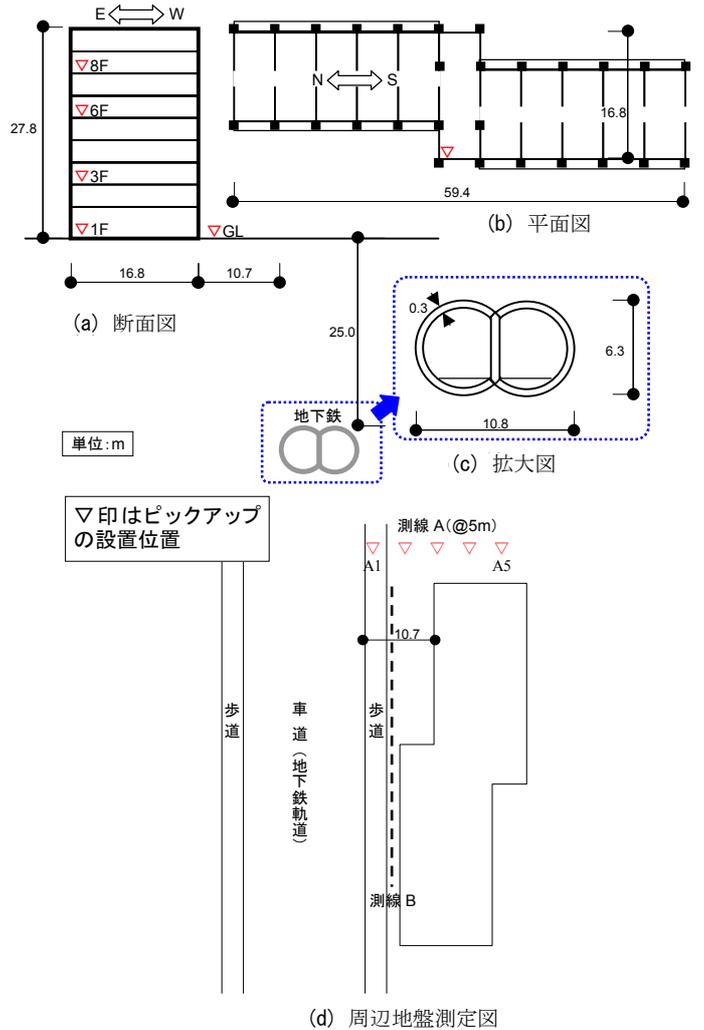


図-11 建物 B および周辺地盤と地下鉄に関する概要図

ル比が大きくなることについては、建物の部材振動あるいは外部騒音による建物の振動などが原因と考えられるが、詳細は今後の研究課題としたい。

e) 免震層による上下動の低減効果

図-9に免震層の伝達特性として B1F に対する 1F のスペクトル比を示す。スペクトル比は、50Hz 付近までは 0.8 程度、50Hz~80Hz でやや増幅するものの、80Hz 以降は再び小さくなるなど、ある種の周波数特性を有するようであるが、全体としては約 0.8 程度の値を示している。このことから、免震層の上下動に対する振動低減効果は若干認められるものの、免震層に対して顕著な上下動低減効果は認められない。これは前報<sup>1)</sup>で示したように、免震層による上下動の低減効果は上部構造を含めた振動系全体で考える必要があり、上部構造の階数が多くなるほど(上下1次モードの固有振動数が小さくなるほど)、また免震装置の鉛直剛性が大きくなるほど低減効果は小さくなる。建物 A の免震装置の詳細な諸元は不明であるが、総階数は 13 階と比較的階数が多いため、顕

表-3 建物 B 付近の推定された S 波速度構造

層番号	深度 (m)	層厚 (m)	S 波速度 (m/s)
1	-0.85	0.85	295
2	-3.28	2.43	397
3	-5.12	1.84	494
4	-7.53	2.41	255
5	-11.64	4.11	199
6	-18.65	7.01	512
7	—	—	952

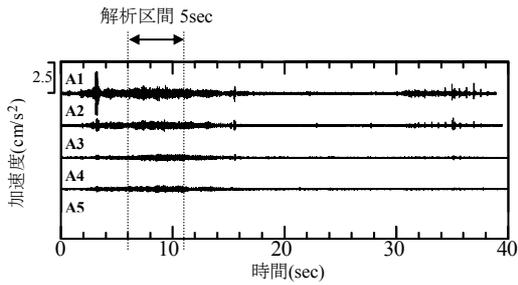


図-12 地下鉄の地盤振動波形例(建物 B;UD 成分)

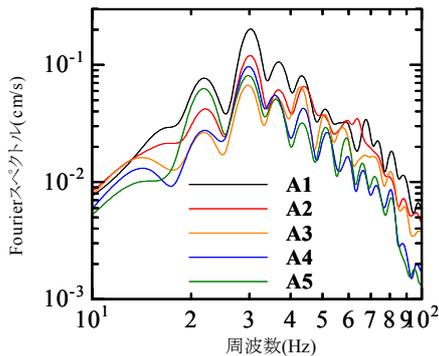


図-13 測線 A の Fourier スペクトル(建物 B)

著な上下動の低減効果が見られなかったものと推察される。

f) 建物内における振動伝搬特性

図-10 に 1F に対する 5, 9, 13F のスペクトル比を示す。振動モードに起因する凹凸はあるものの、ほぼ 1 付近に分布することが注目される。すなわち、地盤から基礎を介して建物に入射した高周波振動は、建物内ではほとんど減衰することなしに建物全体に伝播し、床や壁を振動させていると考えられる。このことから、建物 A においては建物内における振動低減効果はあまり期待できないことが分かる。

(2) 建物 B における振動測定結果

a) 測定概要

図-11 に建物 B および周辺地盤と地下鉄に関する概要

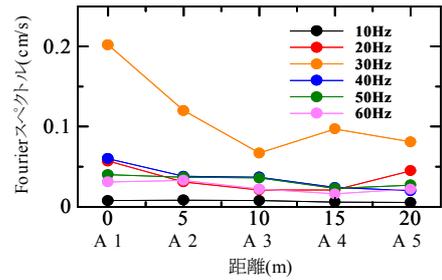


図-14 測線 A の距離減衰特性(建物 B)

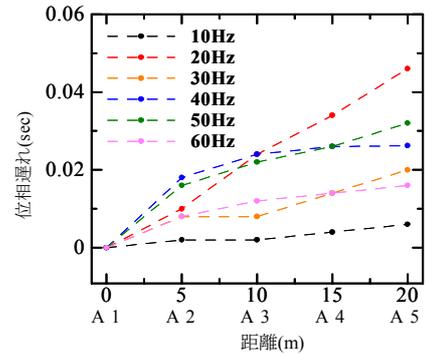


図-15 測線 A の各周波数における走時曲線(建物 B)

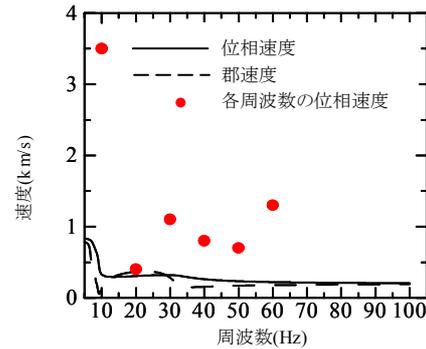


図-16 実測による位相速度と理論 Rayleigh 波分散曲線

図を示す。建物から水平に 10.7m, 路面から 25.0m の深さの位置に函体がある。函体は、高さ 6.3m, 幅 10.8m, 厚さ 0.3m のシールドトンネルである。建物は長方形を一部雁行させた約 59m×17m の平面を有する 9 階建の寮である。構造種別は SRC 造 (充腹) であり、基礎は直接基礎である。測定および波形の分析方法は建物 A において使用した測定システムおよび分析方法を用いた。

b) 速度構造調査結果

表-3 に測線 B において SWS 法によって算定した S 波速度構造の推定結果を示す。建物 B の周辺地盤の S 波速度分布は、約 200m/s から 950m/s と変化に富んだ分布をしているが、比較的 S 波速度の大きい構造となっている。

c) 地盤の波動伝搬特性

地盤振動の測定は、地下鉄走行方向に直交する測線 (測線 A) で実施した。測線 A における測定波形例を図

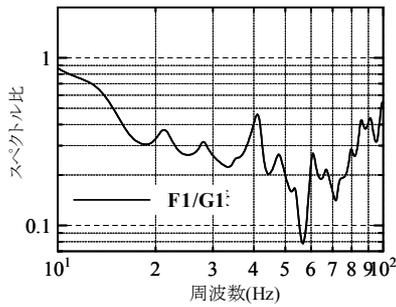


図-17 Fourier スペクトル比(建物 B; 1F/地表)

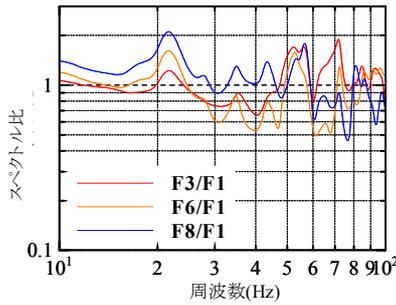


図-18 Fourier スペクトル比(建物 B; 各階/1F)

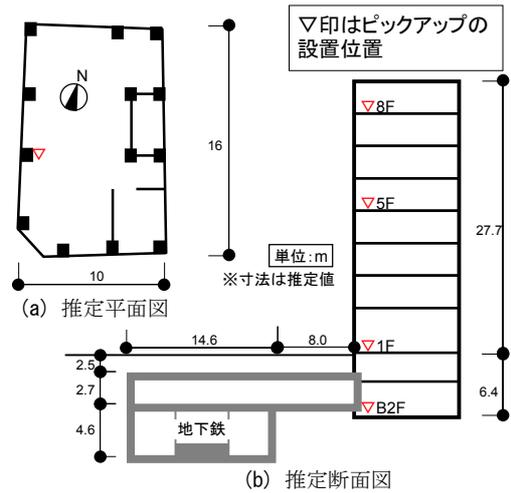


図-19 建物 C と地下鉄に関する概要図

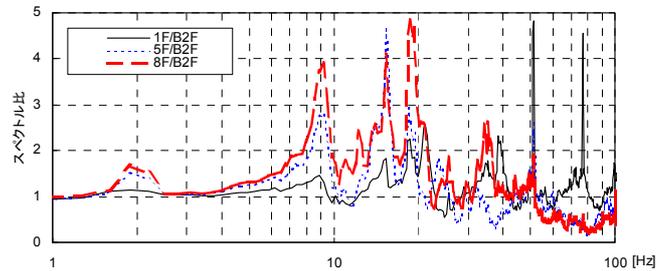


図-20 建物 C と Fourier スペクトル比(各階/B2F)

-12 に示す。図-13 に測線 A の A1~A5 における Fourier スペクトル (波形の紡錘形部分の 5 秒間) を示す。30Hz 付近にスペクトルのピークが見られる。図-14 に 10~60Hz (@10Hz) のピーク周波数におけるスペクトル振幅の距離減衰特性を示す。30Hz のスペクトル振幅は距離が遠くなるに従い最初は顕著に低減するが、その後低減は見られない。他の周波数についてはばらつきはあるものの距離に伴う振幅の低減は顕著に見られない。

図-15 に 10~60Hz (@10Hz) の各ピーク周波数を中心周波数とする狭帯域バンドパスフィルターを施した波形から求めた走時曲線、図-16 にこの走時曲線の近似直線から求めた各周波数成分の位相速度 (プロット) と表-3 に示した S 波速度構造に基づく理論 Rayleigh 波分散曲線 (実線: 位相速度, 点線: 群速度) を示す。位相速度は Rayleigh 波分散曲線に比べて大きく、その多くが約 1000m/s 付近に分布している。この速度は表面波が卓越している建物 A 付近の周辺地盤の 5 倍以上の位相速度である。したがって、建物 B における地盤振動は表面波より実体波が優勢であると推測される。これは、建物 B 付近を通過する地下鉄軌道の深度が深いため、表面波が生成されにくいことに起因しており、地下深部で発生した地下鉄振動は非常に小さな入射角 (ほぼ鉛直) で地表に

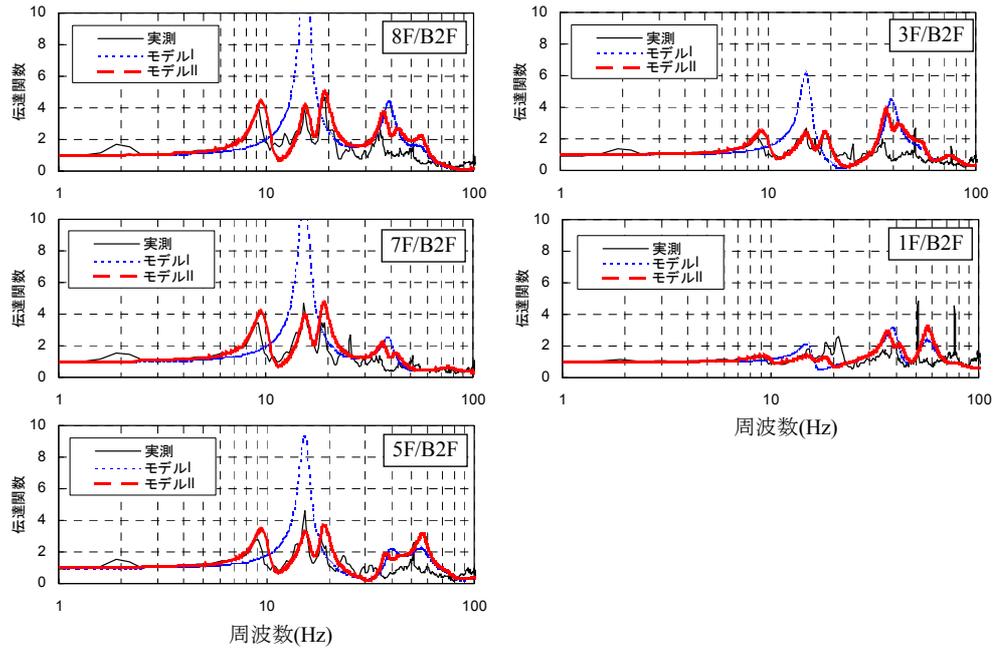
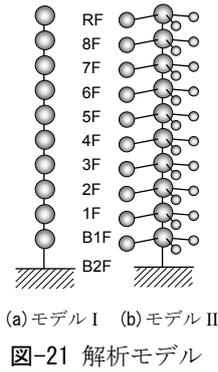
達するため、見かけの位相速度が大きくなっていると考えられる。

d) 基礎の入力損失特性

図-17 に地表面に対する基礎のスペクトル比を示す。スペクトル比は 10Hz 付近から 1 以下となり、60Hz 付近で最小値となり、これより高周波振動では再び大きくなる。建物 A の周辺地盤と比較すると、高振動数側のスペクトル比の増大を除けば建物 B の方が入力損失の効果が小さい。これは、建物 A の周辺地盤では表面波が卓越しているのに対し、建物 B の周辺地盤では実体波が卓越していることに起因していると考えられる。すなわち、波動の位相遅れと基礎長さとの相対関係から入力損失の程度が決まると仮定すると、見かけの位相遅れが大きい表面波が卓越する場合よりも、見かけの位相遅れの小さい実体波が卓越する場合の方が、入力損失が小さいと考えられる。ただし、建物 B の周辺地盤においても高周波数側で再び入力損失が小さくなる傾向が見られ、今後その原因を究明する必要があると考えている。

e) 建物内における振動伝搬特性

図-18 に 1F に対する 3F, 6F, 8F のスペクトル比を示す。凹凸があるものの、高周波数領域においてどの階に対しても平均的に 1 程度以上となっている。建物 A と同様に



建物内における振動の減衰は小さいと考えられる。

### (3) 建物 C における振動測定結果

#### a) 測定概要

図-19 に建物 C と地下鉄函体に関する諸図を示す。なお竣工は昭和初期であり、建物と地下鉄に関する図面がないため、寸法は一部の実測値から推定した。建物は約 16m×10m のほぼ長方形をした 8 階建の事務所である。構造種別は SRC 造（非充腹）であり、基礎形式は未確認であるが基礎深度・地盤状況から直接基礎と推定される。対象建物は測定後間もなく解体され現在は存在しない。測定には周波数範囲が DC～100Hz である 1 成分加速度計（VM-5122, IMV 製）を用いた。同図にピックアップの配置を示す。データはサンプリング周波数 1kHz, A/D 変換は 16bit で収録した。

#### b) 測定結果

図-20 に B2F に対する各階（1F, 5F, 8F）の Fourier スペクトル比（UD 成分）を示す。スペクトル比は前述した 2 建物における分析と同様に各測定結果のアンサンブル平均とした。ここでは後の解析との関連を見るために、Fourier スペクトルに対してバンド幅 0.5Hz の平滑化処理を行った。約 50Hz より低周波数側ではおおむね 1 を上回っているが、高周波数側では 5F, 8F において 0.5 程度の比較的フラットな値となっており、建物 A, B とは若干異なった高振動数側で伝達特性が小さい傾向を示している。このことは、戸境壁や間仕切壁など平面計

画上様々な区画の多い住宅系の建物 A,B に対して、建物 C はほとんど区画がなく、高振動数側で共振するような部材が少ないことが影響しているものと思われる。

### 3. 質点系応答解析による振動伝搬特性の検討

質点系モデルによる高周波数領域の振動特性の予測可能性を検討する。ここでは建物 C を対象とする。図-21 に解析モデルを示す。解析モデルは各階の中心に柱梁とスラブの一部の質量を柱の鉛直ばねを介して連結したモデル（モデル I）と、さらにそれらの各質点からスラブ振動を模擬する等価ばねを介して 1,2 次有効質量を接続したモデル（モデル II）とする。図面がないため質量およびばね定数の各値は推定した部材寸法から換算し、測定結果を参考に若干修正した値を使用した。減衰定数はモード別減衰で与え、1 次, 2 次および 3 次以降の振動モードに対してそれぞれ 0.05, 0.07, 0.10 とした。図-22 に B2F に対する各階の伝達関数を実測と解析とを比較して示す。約 30Hz 以下の低周波数領域における伝達関数を見ると、モデル I よりモデル II の方が実測と整合している。ただし、40Hz 付近ではピーク振動数はおおむね整合しているが、モデル I, II とも実測結果より大きな評価となっている。このことからモデル II のように建物の各部材の振動特性を適切に評価することができれば、質点系モデルによって 100Hz 程度までの振動特性を評価することが可能と考えられる。共同住宅である建物

A, B に対する解析との整合性については今後の検討課題としたい。

#### 4. まとめ

地下鉄軌道近傍に建つ3棟の建物で行った振動測定の結果、以下のような結論が得られた。

- ① 地下鉄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ことができると考えられる。
- ② 各周波数成分の位相速度から、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を主とするが、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。
- ③ 位相遅れの大きい表面波を受ける基礎のほうが、見かけの位相遅れの小さい実体波を受ける基礎よりも入力損失が大きいものと考えられる。
- ④ 最下層に対する各階の Fourier スペクトル比は、振動モードによる凹凸はあるものの、共同住宅（建物 A, B）よりも事務所建物（建物 C）のほうが高振動数領域において小さい傾向を示す。

- ⑤ 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。
- ⑥ 今回測定した免震建物（RC造13階建て）における免震層の上下動に対する振動低減効果は顕著でない。

謝辞：本論文の作成に当たり、名古屋大学澤田義博教授、福井工業大学野路利幸教授、(株)NTT データ大橋哲朗氏（当時名古屋大学大学院修士課程）には、多大なるご指導とご教示を頂くだけでなく、振動測定に関するデータ提供をして頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山岸邦彰, 岩本毅, 谷垣正治, 原田浩之, 嶋田泰：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報告書, No.2, pp.135-144, 2004.
- 2) 澤田義博, 大橋哲朗, 山岸邦彰, 野路利幸：地下鉄走向に伴う振動の地盤・構造物への伝達特性について, 第112回物理探査学会講演概要集, (投稿中)
- 3) 大橋哲朗：地下鉄走向に伴う振動の地盤・構造物への伝達特性に関する研究, 修士論文, 2005.