

# 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究（その2）

——建物への入力損失効果，建物内の伝搬について——

吉原 醇 一 中村 充  
安井 讓 平野 滋

## Propagation Properties of Subway-induced Vibration (Part 2)

——Filtering Effects of Foundation Slabs and Structure-borne Vibration——

Jun-ichi Yoshihara Mitsuru Nakamura  
Yuzuru Yasui Shigeru Hirano

### Abstract

Propagation properties of subway-induced vibration from the ground into a building and through members of the building are described in the paper.

According to measurements of vibration from the ground into a building, a foundation slab has a filtering effect mainly against horizontal vibration, while a concrete pile has a filtering effect against vertical vibration. It is shown by the results of measurements of structure-borne vibration in a steel-framed reinforced concrete building that vertical vibration of a column is amplified during its propagation to upper floors at the first natural frequency of the building, and that vertical vibration of a slab with a steel deck has more than ten times the amplitude of that of adjacent columns even at high frequencies.

Through several simulations, it is shown that the amplifications for columns and slabs can be simulated using a lumped mass model and an FEM model, respectively.

### 概 要

本研究は、地下鉄振動の建物への影響を事前に予測し評価する目的で行なったもので、伝搬経路に従って、前報（その1）の「地盤の振動伝搬性状」に続き、本報では、「地盤から建物への入力損失効果」と「建物内の振動伝搬性状」について、測定と解析との比較・検討結果を報告する。入力損失効果については、耐圧版と杭によるものと分離し、結果から水平方向の効果の大部分は耐圧版に、上下は杭に期待できるという知見を得た。建物内の伝搬については、SRCの柱では建物の上下の固有振動数で1階に対し8階で2倍程度の増幅があること、柱による伝搬は質点系モデルでシミュレート可能であること、スラブでは1次の固有振動数において15倍前後の大きな増幅を示し、更に高い振動数でも数倍～10数倍程度の増幅が見られること、スラブを高振動数まで精度良く評価するためにはFEMのようなモデル化手法が必要である、などの結論を得た。

## 1. はじめに

鉄道や地下鉄構築に近接して建設される、振動を嫌う事務所ビル、研究施設や更に静寂さも強く要求される音楽ホールのような建物の振動及び固体伝搬音の影響を事前に予測し、防振・防音対策を検討することを目的として、地盤の伝搬性状及び建物内の伝搬特性の解明を行なうこととして、前報（その1）<sup>1)</sup>では、伝搬経路に従って、先ず「地盤の振動伝搬性状」についての検討結果を報告した。

本報では、（その2）として「地盤から建物への入力損失効果」と「建物内の振動伝搬性状」について、新築工事の地盤と建物で行なった測定と解析との比較・検討結果を報告することとする。なお、ここに示す例は、前報

で扱った丸の内線・東池袋の建設現場において実測されたものである。

前報で述べたように、地下鉄振動は40～80 Hz付近で大きな振幅を示すことから、本報でも100 Hzまでの振動数範囲を検討対象とする。

## 2. 地盤から建物への入力損失効果

2つの施工段階での振動測定、すなわち地下部分掘削終了時の根伐底地盤上での測定と地下室完成時の耐圧版上での振動測定結果とから、地盤から基礎地盤への入力損失効果の検討を試みた。

### 2.1 実測に基づく入力損失効果の把握

図-1には、地下部分掘削時の根伐底地盤上測点と地下部分完成時の基礎地盤上の測点とを重ね書きして示す。

図中▽印が掘削終了時の測点を、また▼印は地下部分完成時の測点を示している。掘削終了時の測点では、2、3及び4は根伐底の地盤上を、3Pは杭頭を表わす。また地下部分完成時では、2は上記同様に根伐底の地盤上測点を、4、5は杭頭位置の耐圧版上測点を示す。測点2は上記の2つの施工段階を通して同一場所に設け、比較の際の基準点とした。測点2には捨てコン打設前に約

60 cm 角のコンクリート流入防止用の型枠を入れ、以後の測定時にも地盤が露出したままの状態になるようにした。なお、杭は場所打ちコンクリートの拡底杭である。

図-2には、根伐底の地盤測点3における加速度の時刻歴波形例を示す。図中のXは構築に直交する水平方向を、Zは上下方向を表わす。

ここでは、入力損失効果の評価・検討に1/3オクターブ

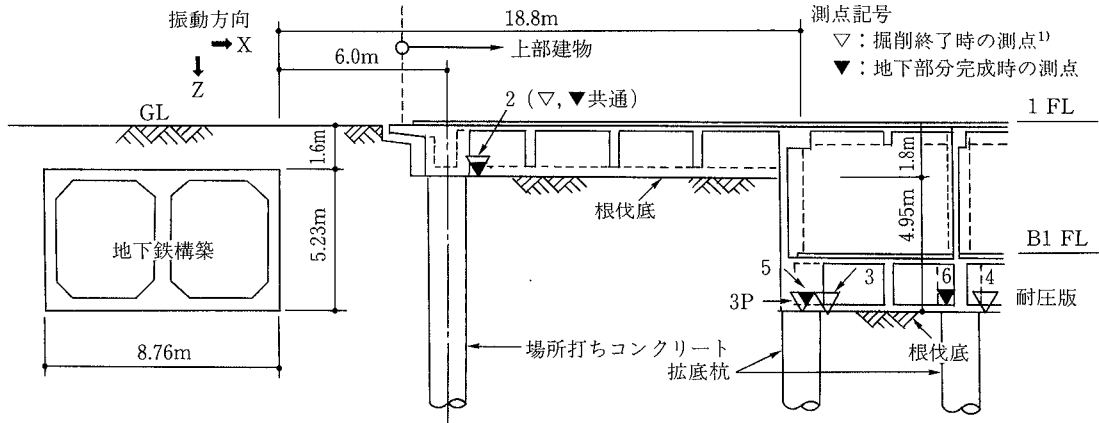


図-1 構築と根伐底・耐圧版測点との位置関係

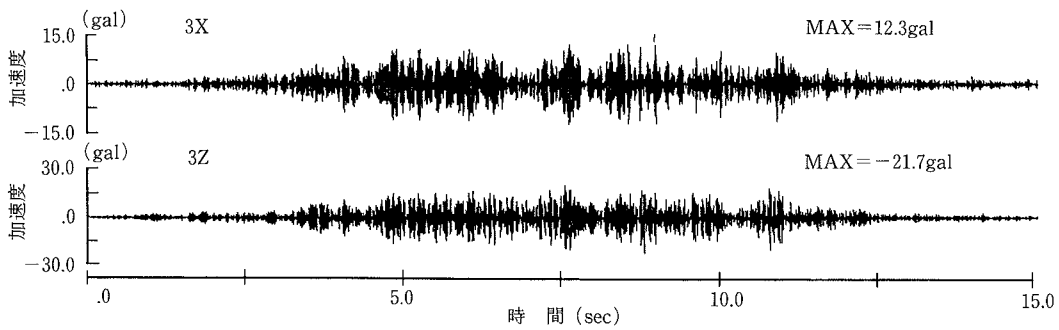


図-2 測点3の時刻歴波形例

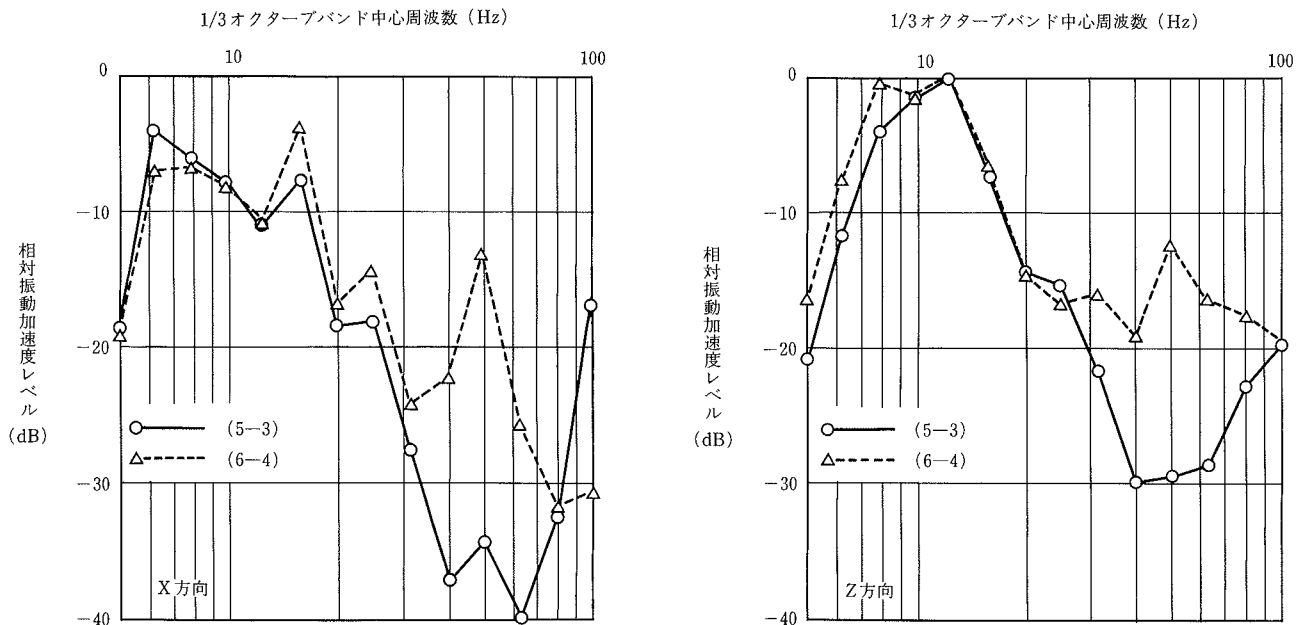


図-3 基礎底盤の入力損失効果

分析による振動加速度レベルを採用することとする。基礎底盤(耐圧版と杭)の入力損失効果は、基礎底盤測点の振動加速度レベルから、耐圧版打設前の地盤上測点の振動加速度レベルを差し引き、更に基準点2における2つの施工段階での振動加速度レベルの差で補正を行なって求めている。なお、各測点の振動加速度レベルとして採用した値は、当日測定した20数本の電車の内、時刻歴波形上で加速度値の大きいものから上位6本ないし8本を平均したものである。

図-3には、上記の方法で求めた基礎底盤の測点5、6の入力損失効果の様子を示す。左図がX方向、右図がZ方向のものである。同図から、X方向・Z方向とも、高振動数ほど入力損失効果が大きいことが分かる。X方向の6 Hz以下とZ方向の10 Hz以下では、入力損失効果が低振動数ほど大きいように見えるが、これは記録波形ではこの振動数領域にパワーを持たず、ノイズレベルの誤差によるものと思われる。両図とも、50 Hz付近で測点5、6の入力損失効果にやや隔たりが見られるが、これは次の理由による。すなわち、耐圧版打設前は、測点3よりも測点4の方が遠方であることから距離による減衰効果があった。しかしながら、耐圧版打設後は、耐圧版が一体となって動くことにより、測点5、6が同程度の振幅となり、見掛け上の入力損失効果が遠方の測点6で小さく評価されてしまうことによると思われる。

図-3に示す入力損失効果には、耐圧版によるものと杭との双方が含まれている(耐圧版+杭)。ここでは、上記の入力損失効果を耐圧版による部分と杭によるものとに分離することを試みる。対象とした測点は、地下部分完成時の測点5である。ここで、基礎底盤上(測点5)の振動加速度レベルから耐圧版打設前の杭頭(測点3 P)の振動加速度レベルを差し引くと、耐圧版のみの振動量すなわち耐圧版のみの入力損失効果が得られる。この方

法で求めた結果を図示したのが図-4である。図中の記号○印は、耐圧版と杭の入力損失効果の和(耐圧版+杭)を示し、×印は耐圧版のみの効果を表わしている。同図には、XとZの2方向について示しておいた。

同図の実測結果によると、入力損失効果全体のうち、耐圧版による部分と杭による部分のそれぞれの割合を振動方向別に見てみると、Z方向は耐圧版よりも杭による部分の割合が大きいものに対して、X方向は耐圧版による方が杭よりも大であるという傾向が得られている。

### 2.2 入力損失効果の解析による評価

図-4の実測結果に対して、入力損失効果に関する既往の理論式<sup>2)</sup>を用いて、実測結果との比較検討を試みた。式を次に記す。

$$\eta = \frac{V}{\pi B f} \cdot \sin \frac{\pi B f}{V} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $\eta$  は地動と基礎底盤との変位振幅比、 $B$  は基礎底盤の長さ、 $V$  は波動の伝搬速度、 $f$  は振動数である。ここに、 $V$  は表面波の近似速度としてS波速度を用い、 $V_s = 180$  (m/s)としている。基礎底盤の長さは  $B = 22$  (m)である。これらの値を(1)式に代入し、その包絡線を計算した結果を理論値として、図-4中に実線で示す。理論から期待される入力損失効果は、測定結果との比較では、X方向では耐圧版のみの効果にほぼ近いが、Z方向では耐圧版のみの効果よりはるかに大きいという結果になっている。ただし、Z方向は杭も含めるとほぼ同程度になっている。

測定結果から、最小二乗法により(1)式の包絡線を逆算した結果を図中に示す。耐圧版のみの効果から求めた結果を一点鎖線で、耐圧版と杭の効果から求めた結果を破線で示す。図中の理論値の勾配に対し、耐圧版のみの効果の測定値の勾配は、X方向が0.75、Z方向では0.22と得られる。これは、例えばX方向では80 Hz付近

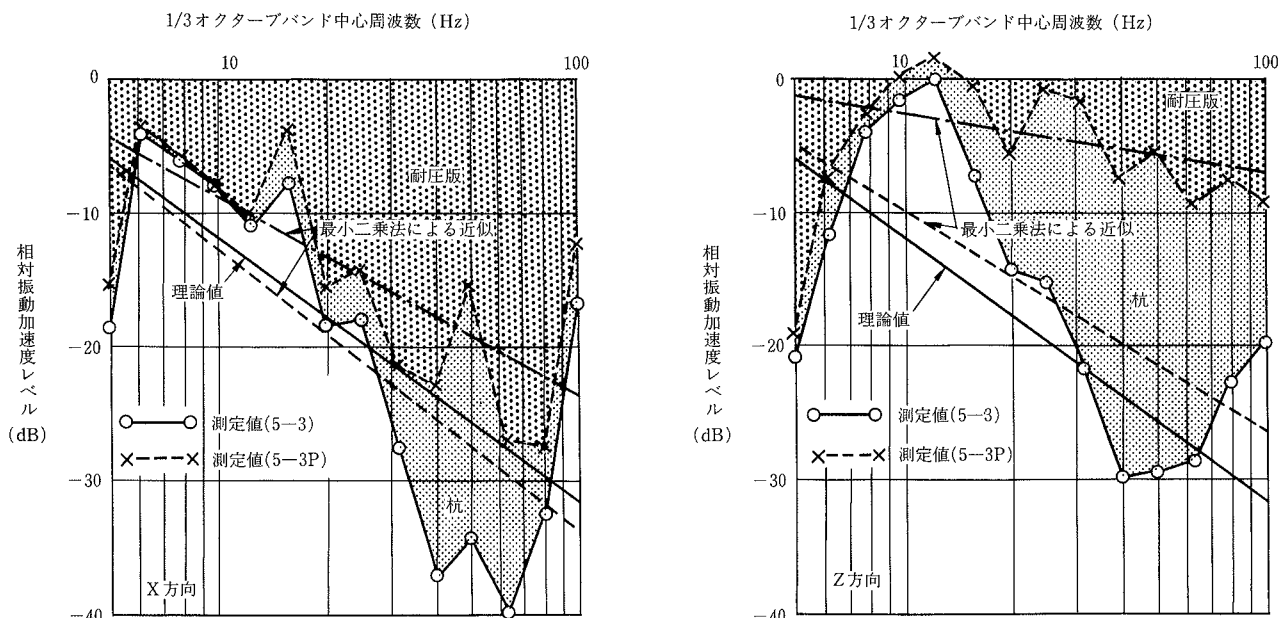
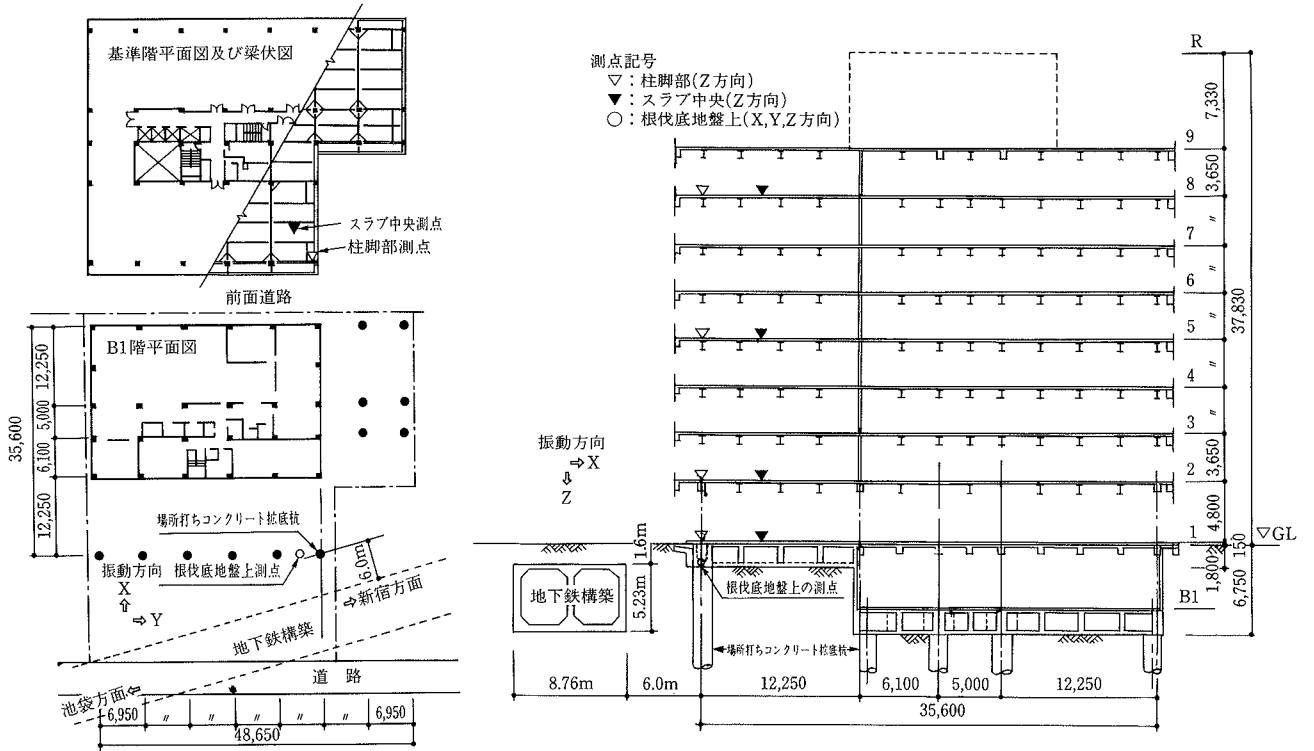
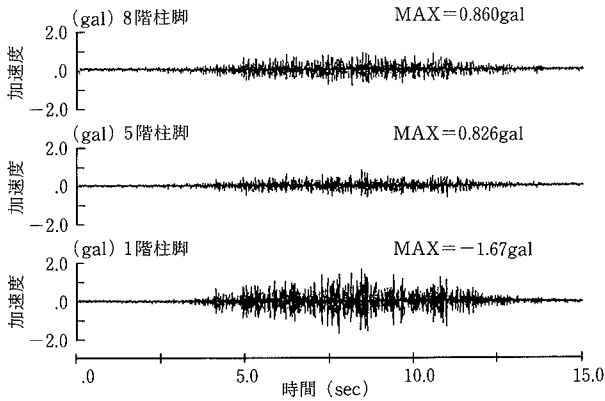


図-4 耐圧版と杭の入力損失効果の割合



図一五 構築と柱脚部・スラブ中央測点との位置関係

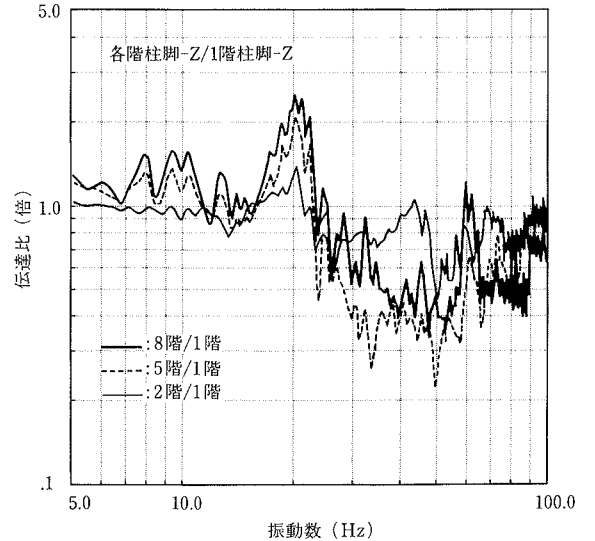


図一六 柱脚における時刻歴波形

では理論値と比較して7~8 dB程度の差しかないが、Z方向の80 Hz付近では理論値より20 dB以上も効果が小さいことを意味する。一方、耐圧版と杭による効果の測定値の勾配は、理論値の勾配に対してX方向が1.07、Z方向では0.84と得られている。

以上から、水平方向の入力損失効果は、杭のあるなしに関わらず(1)式により予測が可能である。

また、上下方向の入力損失効果は、杭がなく耐圧版のみの場合、(1)式による評価は過大評価となる。しかし、杭と耐圧版を有する構造の場合、(1)式による上下方向入力損失効果の評価は、杭と耐圧版の全体による効果と一致することから、(1)式を用いて上下方向入力損失効果を予測することが可能であると考えられる。



図一七 各階柱脚部の1階柱脚部に対する振動伝達比

### 3. 建物内の振動伝搬性状

#### 3.1 実測に基づく建物内の伝搬性状の把握

建物竣工時に測定を行ない、建物内の伝搬性状を、柱による上階への伝搬とスラブによる増幅とに分離して把握した。

この建物は、地上8階・地下1階の事務所ビルであり、構造は、地階はRC造、地上階の柱はSRC造、梁はS造である。

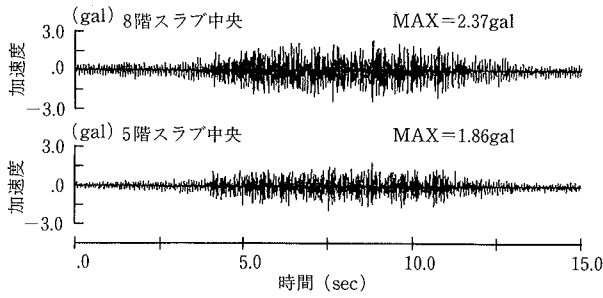


図-8 スラブ中央における時刻歴波形

最終的に問題となるスラブの上下動を評価するために、ここでは上下動のみを扱っている。

なお、この章では、伝搬性状の評価検討に際して、振動数を細かく把握する必要があるため、フーリエ解析を用いている。

3.1.1 柱による上階への伝搬 図-5には、地下鉄構築と建物との位置関係とセンサーの各階への設置位置とを示した。センサーの設置位置は、ここでは各階の柱脚部とした。図-6は、地下鉄構築から最短距離の柱脚における電車通過時の1、5及び8階の時刻歴波形である。図-7は、振動の上階への伝搬の様子を示したもので、2、5及び8階の柱脚部振動の1階柱脚部に対する伝達比で示してある。それぞれの曲線は、測定した20数本の電車の最大加速度値の大きいものから上位5本の平均値で表わしたものである。

図から、20 Hz 付近に増幅の顕著な振動数が現われており、8階で2.3倍程度の増幅となっている。これは、建物の上下方向の1次の固有振動数が現われているものと思われる。20 Hz より高い振動数範囲では、振動数の中には伝達比が1よりやや大きくなるものが見られるものの、全体的には1より小さくほとんど柱による増幅はない。

3.1.2 スラブによる増幅 この建物のスラブ構造は、1階以下はRCスラブであり、2階以上はデッキプレートを用いた合成スラブである。版厚は1階は15 cm、2階が16 cm、また3～8階は13 cmである。

測定対象スラブの自由振動実験から求めたスラブの1次固有振動数は、1階が30.5 Hz、2階は17.8 Hz、5及び8階はそれぞれ13.7 Hz・13.5 Hzである。

図-8には、電車通過時の5階と8階のスラブ中央における時刻歴波形を示す。図-6と比較すると、柱脚よりもスラブ中央で振動が増幅していることが分かる。

図-9は、スラブによる増幅を見るために、各階におけるスラブ中央の各階柱脚部に対する伝達比を示したもので、前項と同様に、電車5本の平均値で示してある。ここで、図から、2～8階の合成スラブでは、1次の固有振動数の13.5～17.8 Hzにおいて15倍前後の大きな増幅を示すことが分かる。また、更に高い振動数においても数倍～10数倍程度の増幅が見られる。1階のRCスラブでは1次の固有振動数で約十倍、更に高い振動数でも20倍以上の増幅が見られる。このように、RCスラブ、合

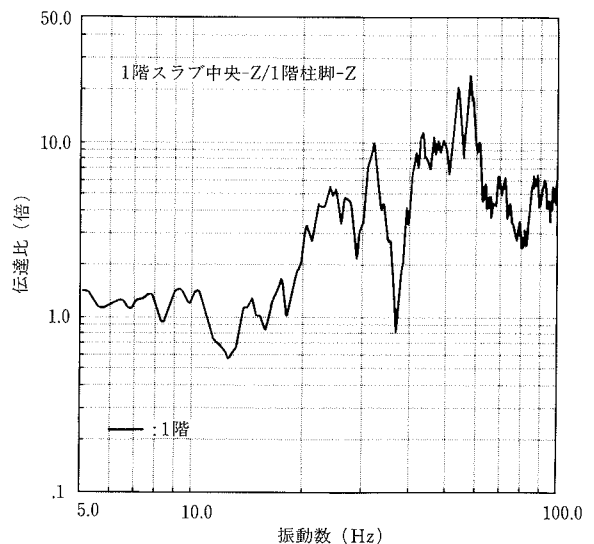
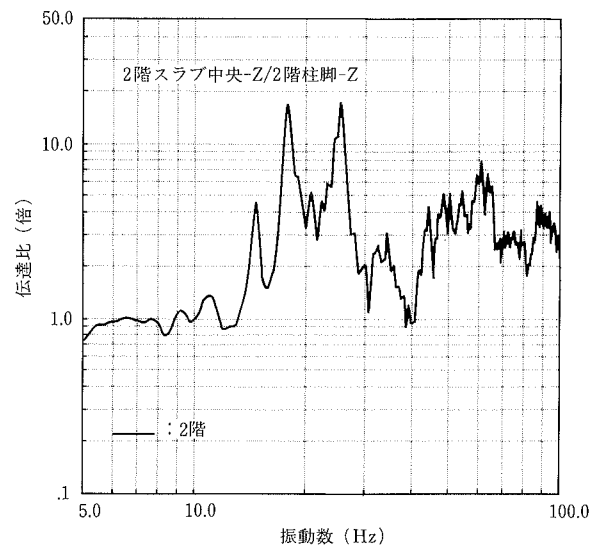
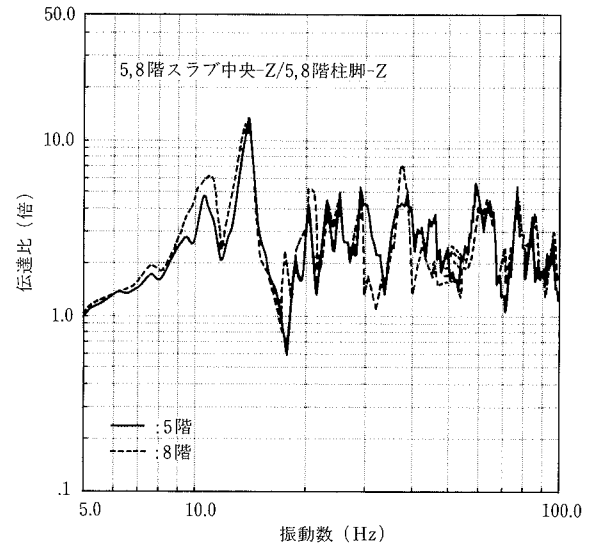


図-9 スラブ中央の柱脚部に対する振動伝達比

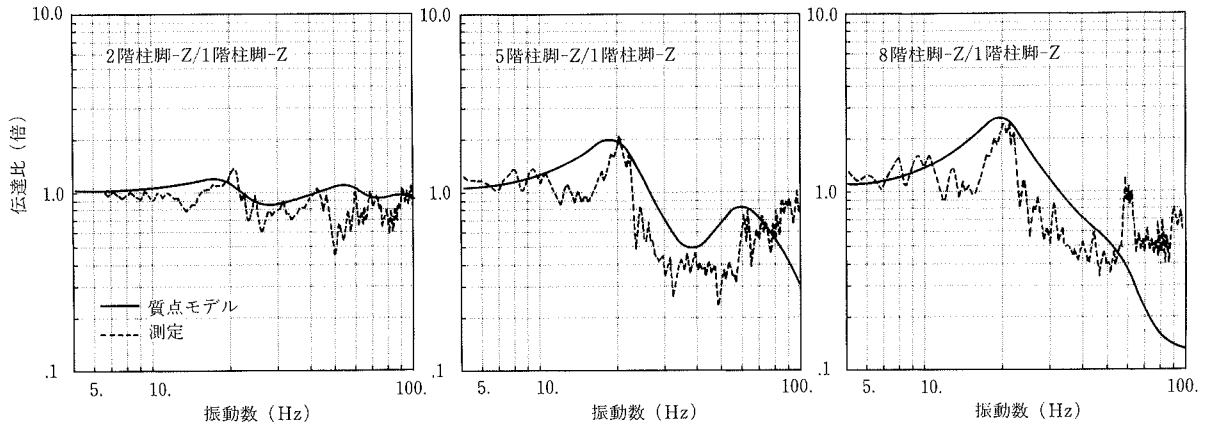


図-11 質点モデルによる各階柱脚部の1階柱脚部に対する振動伝達比

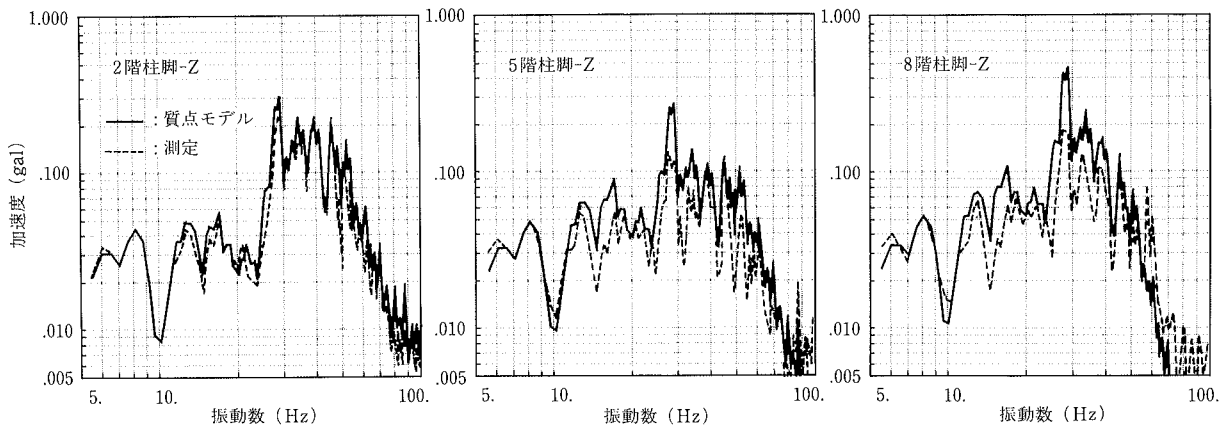


図-12 各階柱脚における応答の周波数分析結果

成スラブいずれも、高次モードにおいてもかなりの増幅が見られるという結果が得られている。

### 3.2 建物内伝搬のシミュレーション解析

ここでは、地下鉄振動の建物内部における伝搬性状を予測する手法について検討する目的で、シミュレーションを行ない、測定結果との比較を行なった。

検討にあたっては、質点モデルを用いた、柱による上階への伝搬シミュレーションと、FEMモデルによる、スラブの増幅シミュレーションとに分けて行なった。

**3.2.1 質点モデルによる上階への伝搬シミュレーション** 建物のモデル化にあたっては、建物全体を対象とするのではなく、地下鉄に最も近接したスパンの4分の1を全階にわたって取出したモデルを作成した。図-10にモデル化の対象とした部分を示す。

ここでは上下方向の自由度のみを対象とし、各階1質点の多質点系モデルとした。モデル化の対象とした部分は地階が存在しないため、基礎は1階脚部で固定とした。各階の重量は、構造計算書の柱軸力リストをもとに算出し、積載荷重を減じて求めた。剛性は、柱及び構造壁を考慮の対象とした。

このモデルの固有値解析結果を表-1に示す。1次固有振動数は19.4 Hzであり、測定で得られた20 Hz付近の固有振動数とほぼ一致している。又、最高次の固有振

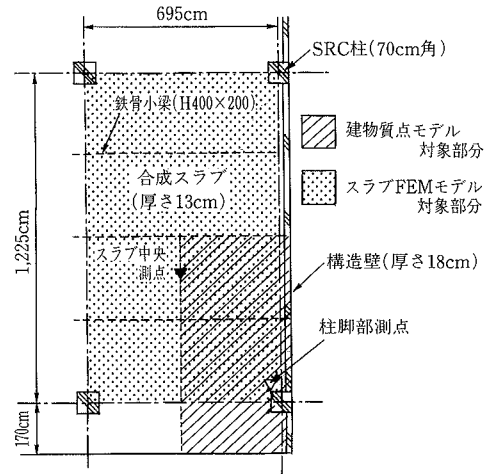


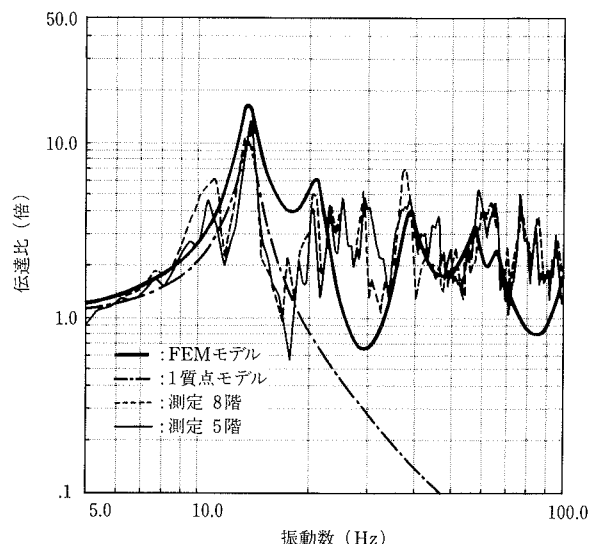
図-10 モデル化対象スパン略図

表-1 建物質点モデル固有値解析結果

次数	固有振動数	次数	固有振動数
1	19.4 Hz	6	177.2 Hz
2	56.6	7	196.6
3	91.4	8	209.1
4	123.8	9	227.9
5	152.4		

表一2 スラブFEMモデル固有値解析結果

次数	固有振動数	スラブ中央の刺激関数	次数	固有振動数	スラブ中央の刺激関数
1	13.82Hz	1.61	16	65.52Hz	-0.183
2	16.10	0.0	17	68.29	0.0
3	21.53	-0.613	18	83.18	0.0
4	26.71	0.0	19	84.05	0.0
5	33.75	0.0	20	85.61	0.0
6	34.89	0.0	21	86.70	0.0
7	37.90	0.409	22	89.84	0.0
8	40.32	0.0	23	89.87	0.0
9	40.77	0.0	24	90.98	-0.008
10	50.65	0.0	25	96.42	0.0
11	57.40	0.0	26	98.14	0.0
12	57.53	0.0	27	103.3	0.228
13	57.97	-0.273	28	111.8	-0.055
14	62.36	-0.024	29	116.6	0.0
15	62.37	0.0	30	116.6	0.0



図一13 柱脚部に対するスラブ中央の伝達比

動数は228 Hzであり、ここで問題としている40~80 Hzの振動数範囲を評価するのに十分なモデルであることが分かる。

測定結果で得られた1次振動数の増幅率に一致するように、モデルの各固有モードに25%のモード減衰を与えて、各階の1階に対する伝達関数を作成した結果を、測定結果による伝達比と同時に、図一11に示す。

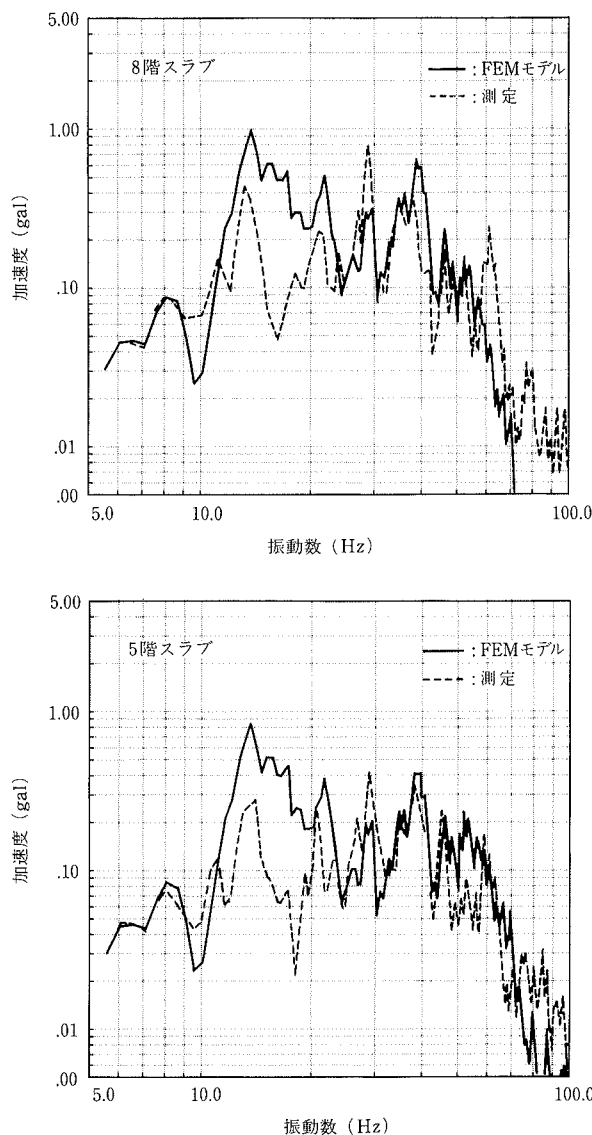
25%という減衰値は、コンクリートの材料減衰が3~5%程度であることから見ると、かなり大きな値であるが、このモデルでは建物の一部分のみをモデル化しているのに対し、実際の建物では、上階へ伝搬した波動は梁柱に伝搬しながら拡散していくため見掛け上の減衰が大きくなるものと思われる。

シミュレーションによる結果と測定結果を比較すると、全体の傾向は一致しているものの、8階における60 Hz以上で多少差があることや、1次固有振動数以外において、シミュレーションによる結果は測定結果よりやや大きめの評価になっていることがわかる。

モデルから得られたこの伝達関数と、1階で測定された波形とを用い、2階・5階・8階柱脚における応答をシミュレートした波形の周波数分析結果を、測定結果と比較して図一12に示す。この図から、全体として測定結果の傾向をかなり良く再現しているといえる。

このように、質点系モデルを用いたシミュレーション手法により、地下鉄振動のような比較的高い振動数範囲にわたる建物内の振動伝搬性状を予測することが可能であることが示された。

3.2.2 FEMモデルによるスラブ増幅のシミュレーション 3.1節に示したように、測定結果からスラブにおける増幅が、数10 Hz以上の比較的高い振動数においても見られることから、スラブをモデル化するにあたっては、比較的高振動数まで扱えるモデルにすることが必要であることは明らかである。例えば、スラブの1次固有振動数のみを対象として1質点によるモデル化をした場



図一14 スラブ中央における応答の周波数分析結果

合、図-13に示すように 20 Hz 以上の振動数では全く測定結果を再現することは出来ない。そこで、ここでは、スラブを FEM でモデル化した場合の、シミュレーション手法としての有用性を検討することとした。

モデル化の対象としたのは、3 階以上の厚さ 13 cm の合成スラブであり、図-10に示すスラブ 1 スパン分を、合成スラブをシェル要素で、鉄骨小梁をビーム要素でモデル化した。要素数は全体で約 200 である。スラブ周辺の固定条件は、スラブ周辺に回転ばねを設けその値を、スラブ 1 次振動数が測定結果と一致するようにパラメトリックに決定している。

この FEM モデルの固有値解析結果を表-2 に示す。表から、このモデルが 100 Hz 程度までの振動数を扱うのに十分であることがわかる。この固有値解析で得られたスラブ中央点における刺激関数を用い、材料減衰として 5% を与えて、柱脚部に対するスラブ中央の伝達関数を作成した。こうして得られた伝達比を測定結果と共に図-13に示す。図から、FEM による結果が、ここで問題にしている 40~80 Hz の比較的高い振動数範囲にわたって測定結果と傾向が良く一致していることが分かる。

FEM モデルから得られた伝達関数と、前節のモデルにより求められた柱脚における応答結果を用いて、スラブ中央における応答を、5 階と 8 階に関して求めた。こうして求めた波形の周波数分析結果を、測定結果と比較して図-14に示す。この図では、5 階・8 階とも 10~20 Hz 付近を除けば、測定結果とかなり良く一致していることがわかる。測定結果との一致が悪い 10~20 Hz の範囲は、図-11に見られる様に、上階への伝搬を予測した質点モデルにおいて 10~15 Hz で大きめに評価されていることと、図-13に見られる様に、床スラブの増幅を予測した FEM モデルにおいて 15~20 Hz で大きめに評価されていることが重なったため、整合性の悪さが目

立ったものと思われる。

このように、FEM モデルによりスラブの増幅特性を高い振動数まで予測することが可能であることが示された。ここで用いた FEM モデルは、比較的小規模で簡便なものであることから、この手法が一般的なスラブの増幅特性予測手法として有用であるといえる。

#### 4. おわりに

本研究は、地下鉄振動の建物への影響を事前に予測し評価する目的で行なったものである。構築から建物内への伝搬経路のうち、今回は地盤から建物への入力と建物内の伝搬に着目した。

本報では、地下鉄構築近傍の新築建物における根伐底地盤と基礎底盤での振動の測定結果に基づき、基礎底盤の入力損失効果を把握した。また、竣工間近のスラブ上での測定結果から、柱による上階への伝搬と柱からスラブ中央への伝搬との性状を把握すると共に、質点モデルによる上階への伝搬と FEM によるスラブ増幅とのシミュレーション解析を行ない、解析結果と測定結果との比較を通して、この手法が地下鉄振動の地盤から建物への入力と建物内伝搬の予測を行なう際の有用な方法であることを示した。今後更に、より多くの実測データの積み重ねを行ない、成果の信頼性の向上を図っていきたい。

続報では、地下鉄振動の伝搬性状のうち、「固体伝搬音の放射」について報告する予定である。

#### 参考文献

- 1) 吉原, 中村, 安井, 縄岡, 平野: 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究 (その1) - 地盤の振動伝搬性状について -, 大林組技術研究所報, No. 42, p. 27~36, (1991)
- 2) 山原 浩: 環境保全のための防振設計, 彰国社, p. 299~304, (1974)