

地下鉄振動の伝搬性状に関する研究（その3）

——電車固体伝搬音の建物内伝搬性状と予測システム全体のまとめ——

縄岡 好 人 吉 原 醇 一 中 村 充
平 野 滋 安 井 譲

Propagation Properties of Subway-induced Vibration (Part 3)

——Propagation Properties of Subway-induced Structure-borne Sound in Building and Concept of Prediction System——

Yoshihito Nawaoka Jun-ichi Yoshihara Mitsuru Nakamura
Shigeru Hirano Yuzuru Yasui

Abstract

Propagation properties of subway-induced structure-borne sound through members of a building and properties of sound radiation from a slab are described in this paper.

The following results are obtained by the measurements of structure-borne sound in a number of buildings and simulation of sound radiation from a slab: ① In the lower stories, sound is radiated from slabs and walls because both horizontal and vertical vibrations have large energy. In the upper stories, horizontal vibration is attenuated more than vertical vibration and sound is mainly radiated from slabs. ② The principal components of frequency characteristics of subway-induced and structure-borne sound are of 40 to 80 Hz, so it can not be treated by diffuse field assumption but must be simulated using an FEM model.

概 要

この研究は、地下鉄からの振動・固体伝搬音の建物内居室への影響に関する予測手法を確立することを目的としており、振動の伝搬経路に従って、「地盤の振動伝搬性状」と「建物への入力損失効果と建物内の振動伝搬性状」については、既に報告してきた。本報告では、「建物内の電車固体伝搬音伝搬性状」の典型的な実測例を示し、「固体伝搬音の放射特性」のFEMモデルによるシミュレーション結果について報告する。また最後に、予測システム全体のまとめも行なう。

今回の検討から、① 建物内の固体伝搬音は、低層階では水平方向の振動による放射音も大きいのが、上層階では上下方向の振動による放射音が主成分となる場合が多い。② 電車からの固体伝搬音は40～80 Hzに主成分があるので、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

近年都市部においては、都市の過密化から、事務所ビルだけでなく音楽ホールや研究施設などの静寂性が強く要求される建物も鉄道や地下鉄構築に近接して建設されることが多くなってきている。そのため、電車により発生した振動が建物内に伝搬し、振動障害だけでなく振動から二次的に励起される固体伝搬音問題が生じる場合も今後益々増加することが予想される。

このような現状を踏まえ、地下鉄から建物への伝搬経路に従って、「地盤の振動伝搬性状」と「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、報告してきた^{1),2)}。

本報では、「建物内の電車固体伝搬音伝搬性状」について実

測例を示し、「固体音の放射特性」についてFEMモデルによりシミュレーションを試みた結果について報告する。また最後に、予測システム全体のまとめも行なう。

2. 建物内の固体音伝搬性状の実測

ここでは、電車走行時の振動加速度および固体伝搬音レベルを建物内で測定した代表的な5例を示す。

2.1 地下鉄構築に近接している集合住宅

この建物は、地下鉄構築に近接している14階建てのRC造の集合住宅である。地下鉄は土かぶり約7mのコンクリート道床箱型構築であり、構築と集合住宅との距離は約10mである¹⁾。

図-1は、地下鉄通過時の床スラブの振動加速度レベルを測定した結果である。図-2は、固体伝搬音レベル

の測定結果であり、オクターブバンド音圧レベルと騒音レベルを示す。結果は電車十数本について示している。

地下鉄の振動が建物内に伝搬したときスラブの振動加速度レベルは63 Hz成分が卓越することは多くの既往の文献で述べられていることであるが、この例でも上下方向については同様な結果となっている。しかしながら、水平方向の振動加速度レベルに着目すると、1階では63 Hzよりも125 Hz成分が大きい。

上下方向の63 Hzの振動加速度レベルは、低層階では1階当たり2~3 dBの減衰が得られているが、加振源から遠くなる高層階では減衰が見られない。

同様に、固体伝搬音レベルも上層階に行くほど減衰が小さくなる。4階以下と4階以上の階で周波数特性が異なり、4階以下では63 Hzおよび125 Hz成分が大きいものに対して、4階より上では31.5 Hz成分が大きくなっていく。これは、4階以下の階では、上下方向の振動だけでなく水平方向の振動も大きなエネルギーを持っており、床だけでなく壁から放射される音の影響も大きいものに対して、4階より上では、水平成分は減衰し、床から放射される音が支配的になることによるためと思われる。

2.2 地下鉄構築に近接している事務所ビル

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、地階がRC造、地上階は柱がSRC造、梁がS造

である。地下鉄は土かぶり約1.5 mであり、構築とビルとの距離は約6 mである²⁾。

地下鉄通過時の床スラブの振動加速度レベル(上下方向)の測定結果を図-3(a)に示し、固体伝搬音レベルの測定結果を図-4(a)に示す。結果は電車数本について示している。

振動加速度レベルは63 Hzよりも31.5, 40 Hzが大きい。これは、地下鉄軌道に防振対策がされている効果によって63 Hz以上の成分が低減していることによるものと思われる。固体伝搬音レベルは、建物内で一様に減衰しておらず、2階および4階で大きい値となっている。

2.3 地下鉄構築の直上に建設された寮

この建物はS造の寮で、高層棟(7階建)と低層棟(2階建)とからなっている。基礎仕様は高層棟は杭基礎、低層棟は直接基礎となっており、2つの棟は、EXP. JOINTにより連結されている。高層棟は、地下鉄構築の両側に施工されたWF杭間に、鋼製の大型基礎桁梁を地下鉄構築を跨ぐ形で配し、この上に建物本体の鉄骨架構を組み立てた構造である。低層棟の直接基礎は、地下鉄構築の直上地盤へ設置する形式である。図-5に建物の概要を示す。

地下鉄通過時の床スラブの振動加速度レベル(上下方向)の測定結果を図-3(b)に示し、固体伝搬音レベル

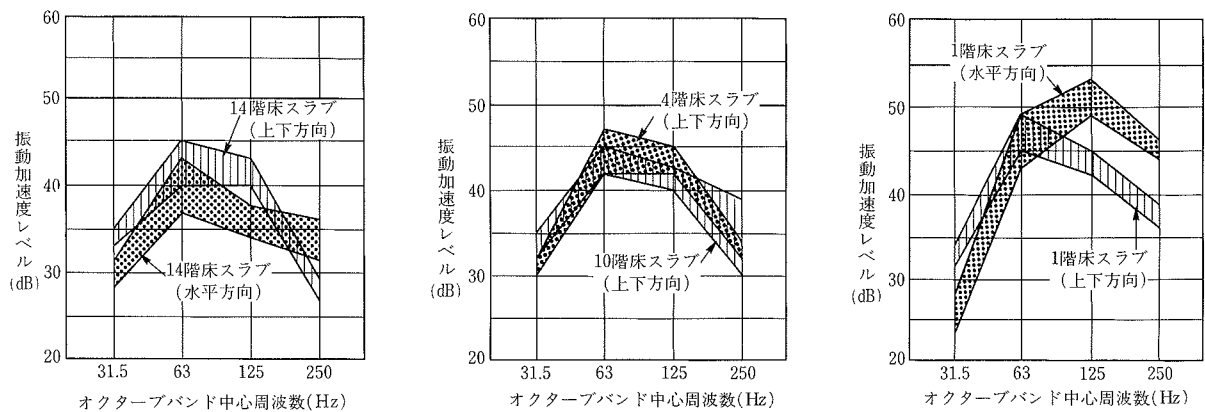


図-1 地下鉄通過時の床スラブの振動加速度レベル

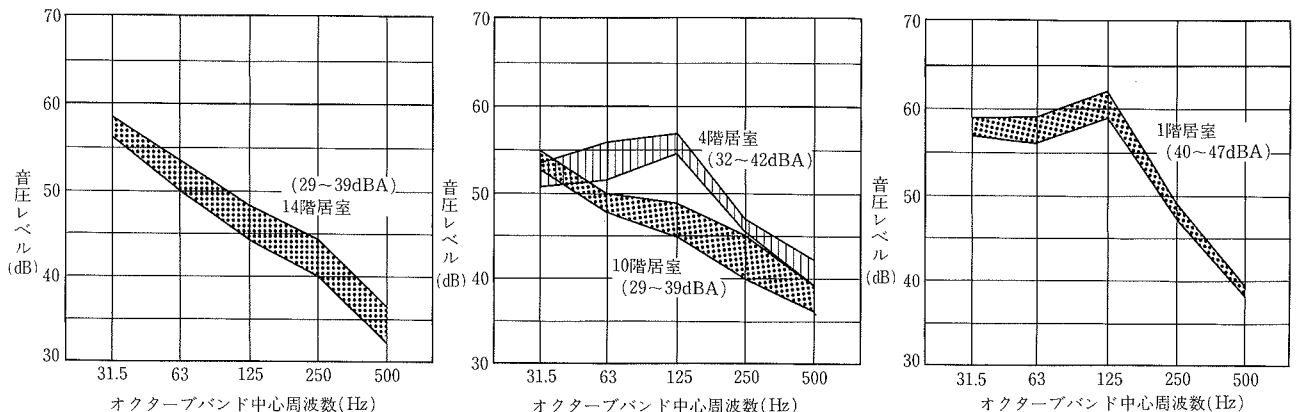


図-2 地下鉄通過時の固体伝搬音レベル

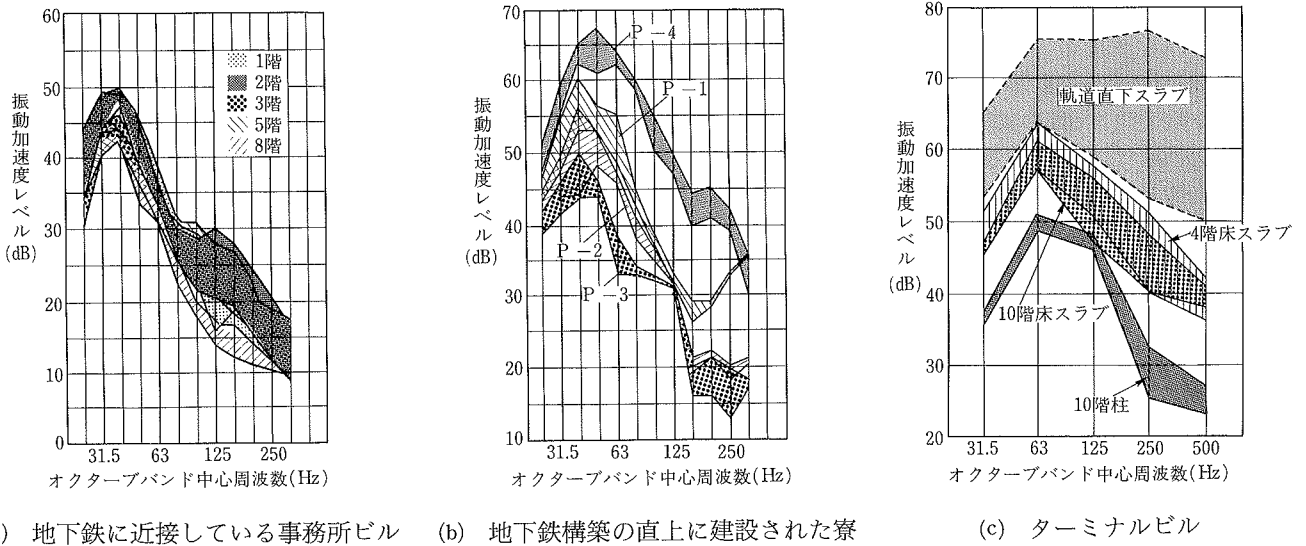


図-3 地下鉄通過時・電車発着時の床スラブの振動加速度レベル (上下方向)

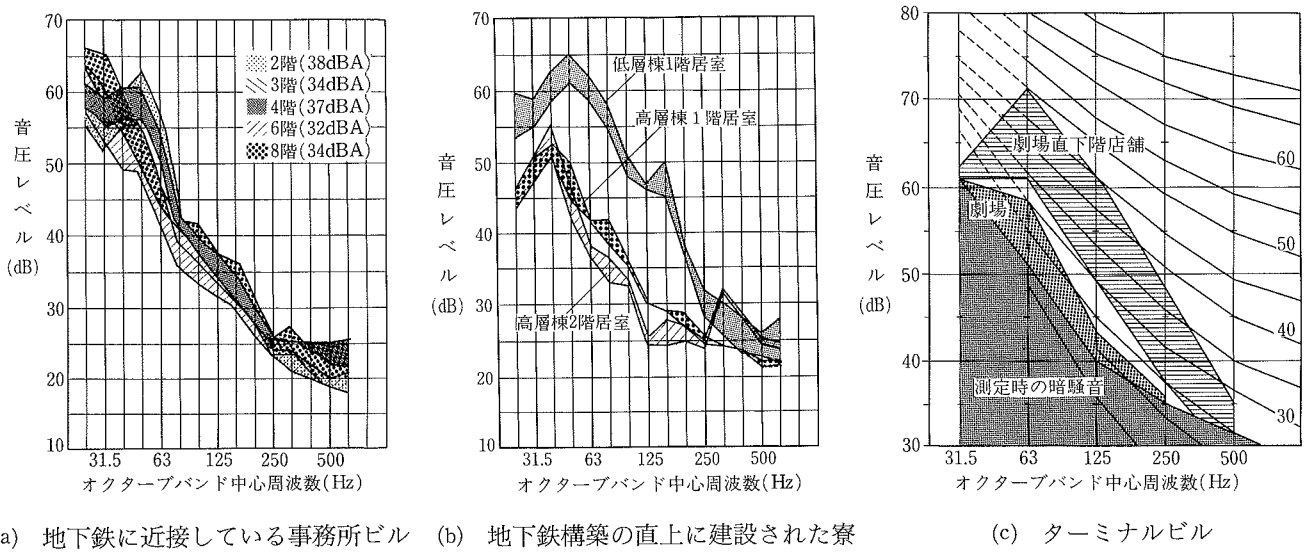


図-4 地下鉄通過時・電車発着時の固体伝搬音レベル

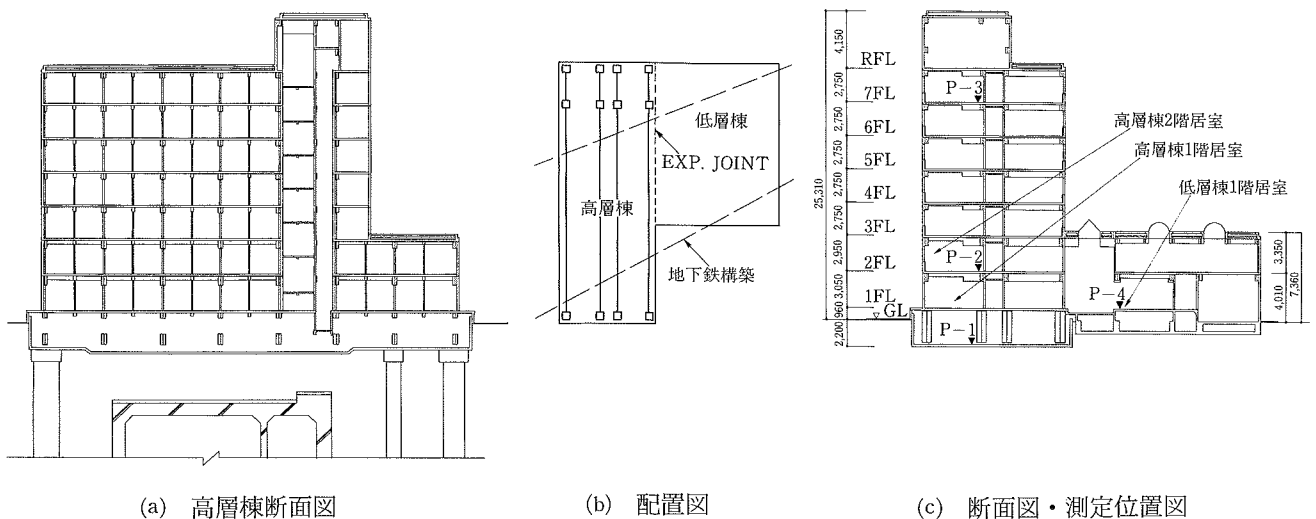


図-5 地下鉄構築の直上に建設された寮

の測定結果を図-4 (b) に示す。結果は電車数本について示している。

高層棟の振動加速度レベルは 40 Hz にピークがあり、2 階と 7 階で約 5 dB の減衰がある。高層棟に採用された構造の効果は、低層棟の1階居室における固体伝搬音レベルを参考とすれば、ほぼ全帯域にわたって 10 dB 以上の減音効果が得られている。

2.4 ターミナルビル

2.4.1 プラットホームより上階のレベル このターミナルビルは、地下 4 階、地上11階の SRC 造の百貨店であり、地上 1 階に電車のプラットホーム、11階に劇場がある³⁾。

電車発着時の床スラブの振動加速度レベル(上下方向)の測定結果を図-3 (c) に示し、固体伝搬音レベルの測定結果を図-4 (c) に示す。結果は測定した数十本の電車の中から上位 6 電車のレベル幅を示している。

軌道直下スラブにおける振動加速度レベルは、約 10 dB 以上のレベル幅となっており、電車によって発生する振動に差があることがわかる。振動加速度レベル値は、地盤を介する地下鉄よりも建物躯体に軌道が直接接するターミナルビルのほうが当然大きくなる傾向が見られ、直下スラブでは 125 Hz 以上の成分も大きく 80 dB 近くとなる。上層階の床スラブでは 63 Hz が卓越しており、10階の振動加速度レベルは最大で 60 dB を越え、固体伝搬音レベルは 50 dBA である。劇場内は固体伝搬音対策として浮構造が採用されており、その対策効果は直下階のレベルを参考とすれば 63 Hz で 10~15 dB である。

2.4.2 プラットホームより下階のレベル このターミナルビルは、地下 2 階、地上 8 階の SRC 造であり、地上 2 階に電車のプラットホームがある。

図-6 は、電車発着時の音圧レベルを測定した結果であり、結果は電車十数本について示す。

プラットホームでは空気伝搬音の影響から 125 Hz 以上の周波数成分も大きいですが、1 階および地下1階では固体伝搬音によって 63 Hz 成分が卓越している。電車走行時の固体伝搬音レベルは、軌道直下階 (1 階) では約 70 dBA であり、地下1階では 60 dBA である。

3. FEM モデルによる固体伝搬音放射のシミュレーション

電車振動が建物内の柱を經由して上階へ伝搬する性状については、前報で述べたように、各階 1 質点の多質点系モデルで精度良く予測できる²⁾。したがって、柱からスラブおよび壁への振動の伝搬性状と固体伝搬音の放射性状が予測できれば、室内における電車固体伝搬音レベルは求めることができる。

ところで、床版などからの固体伝搬音放射については、床版の振動を拡散振動、室内を拡散音場として、室内音場と版振動の相互作用を無視して予測されることが多い。しかしながら、電車固体伝搬音の主成分は、40~80 Hz にあるので、厳密には拡散領域として取り扱えない。

そこで、ここでは、床版と室内を FEM でモデル化し、そのシミュレーション手法としての有用性について検討することとした。

前章で示したように、電車による固体伝搬音は上下方向の振動によって床版から放射される音が主成分となる場合が多いので、ここでは床版を対象としてシミュレーションを試みた。この床版は、前章で示した事務所ビルの 3 階部分のスラブであり、デッキプレートを用いた合成梁スラブであり、版厚は 13 cm である。

床版のモデルは、図-7 に示すスラブ 1 スパン分を対象として、合成梁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、固定条件は周辺完全固定とした。要素数は全体で 240 である。建物の 3 階柱近傍の振動加速

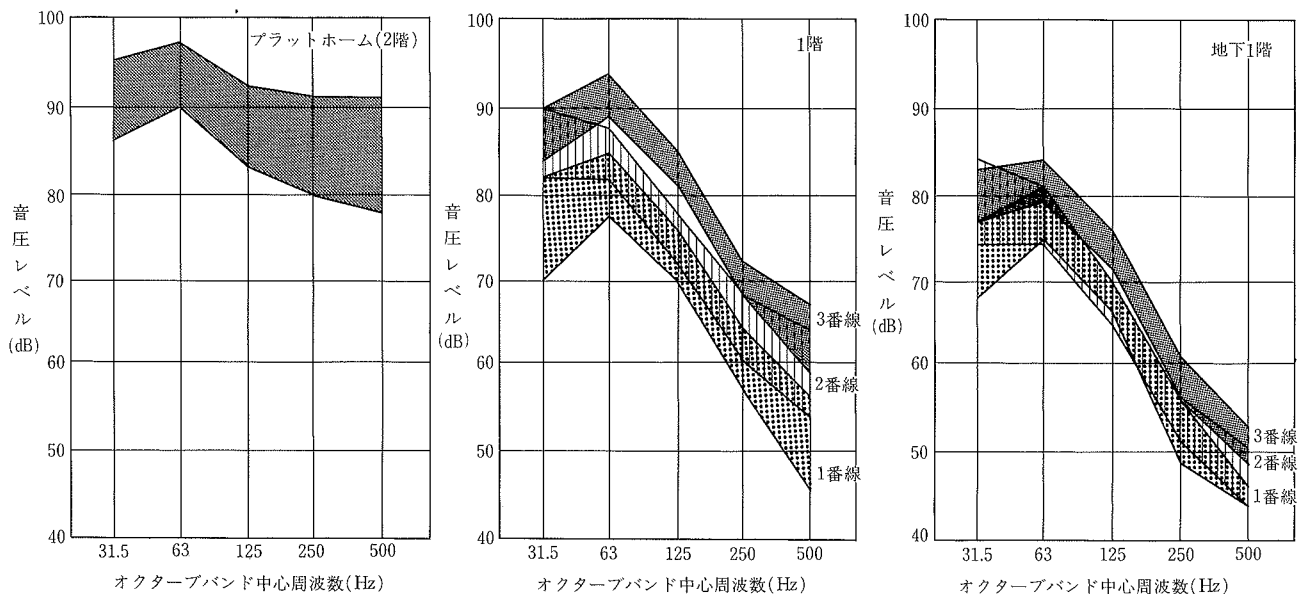


図-6 電車発着時の音圧レベル

度測定結果を入力としてスラブ支持点を加振した時の床版のZ方向の変位応答を求めた。この変位をX-Zの二次元でモデル化した室内音場モデルの境界条件として与え、室内の音圧応答を求めた。室内モデルは床版以外の境界条件は剛壁とし、要素数は120である。

図-8は室内中央(高さ1.5m)の音圧応答の周波数特性について、計算値と実測値の比較を示したものである。実測値は1/3オクターブバンド幅での分析結果であるので、計算値と直接的な比較はできないが、計算値は実測値の傾向を良く表している。

今回のモデルは、FEMモデルのシミュレーション手法としての有用性について検討する目的で、二次元モデルで解析を行なった。FEMモデルにより電車固体音を予測することが可能であることが示されたので、今後、三次元モデルで解析を更に進めていく予定である。

4. 予測システム全体のまとめ

4.1 予測フロー

本研究では、地下鉄振動の伝搬性状について、地盤から建物に至る伝搬経路を追って実測とシミュレーションを比較することで、その予測手法について検討を重ねてきたが、ここでは、それらの予測手法を概括し、予測システムとしての考え方について述べる。

図-9にこの予測システム全体のフローを示す。予測は、伝搬経路を追って、その過程ごとの特徴に適したモデルを用いて行なう。

以下に、各伝搬過程ごとの特徴と予測の考え方について述べる。

4.2 構築直上の振動

システムの入力としては、実測に基づく地盤振動データベースを主に用いるが、これに加えて、地盤モデルによる予測と実測との比較から求められた加振力を、地盤モデルのための入力として用いることも可能である。

構築端部直上の地表における地下鉄振動は、一般的に40~80 Hzに卓越した成分を持っている¹⁾が、周辺地盤・地下鉄構築・道床等の形式によっては振動数成分の特徴に差がある場合もあり、さまざまな場合における実測を積み重ねることが、今後データベースを充実させるうえでの課題であると考えられる。

4.3 近傍地盤の振動性状

地下鉄構築近傍の地表では、構築端部直上から水平に構築下床深さ程度離れた距離までの間では、距離による減衰があまり見られない¹⁾。従って、この範囲内に対象となる建物が存在する場合、安全側評価としては、距離による減衰はないものとして予測を進めることが妥当であると考えられる。

一方、この範囲より遠い部分における距離減衰については、距離原点を構築端部直上にとれば、既往の距離減衰式で計測結果を極めて良く説明できる¹⁾。従って、遠方地表における振動量は、この距離減衰式を用いて予測することができる。

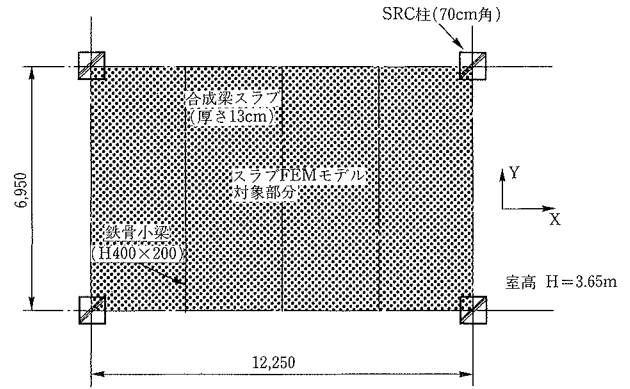


図-7 モデル化の対象とした床版

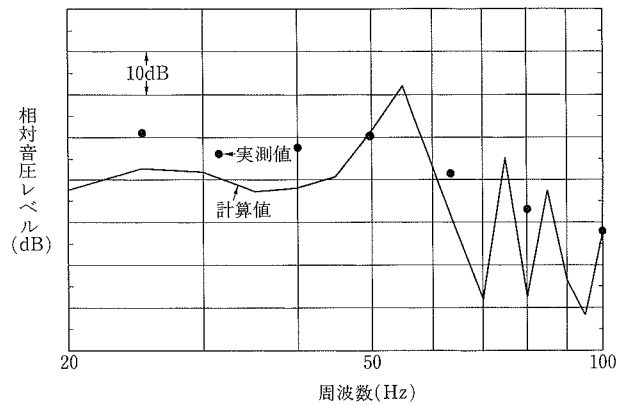


図-8 室内中央の音圧応答周波数特性

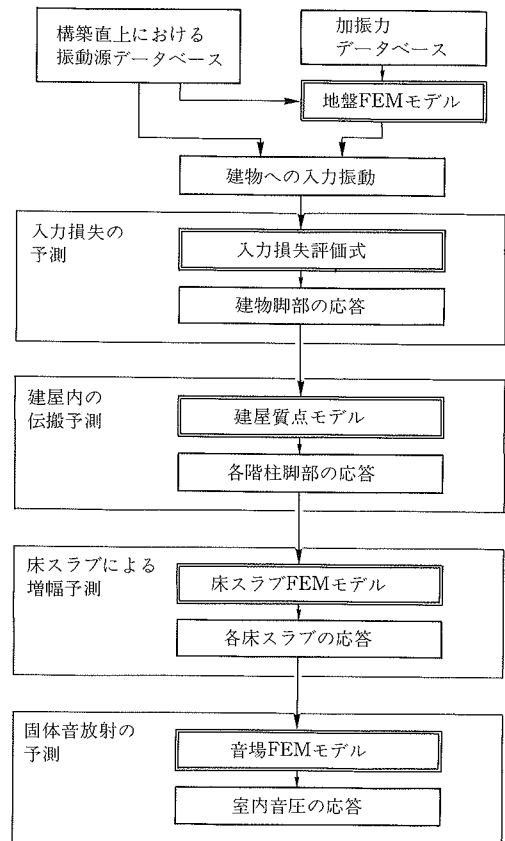


図-9 予測システム全体のフロー

一般的には、地下鉄振動の影響が懸念されることが多いのは、地下鉄構築のごく近傍に建物を建設することから、予測に際しては、近傍地盤での伝搬性状を評価できる必要がある。この際には、2次元FEMが有力な予測手法である¹⁾。FEMを利用することで、掘削による影響や地盤の不整形・不均質性等を評価することが可能となり、又、地中防振壁等の効果予測を行なうことも可能である。

さらに、このFEMモデルによるシミュレーションを通じて得られた、地下鉄振動の加振力は、FEMモデルに対する入力データベースとして有用であると考えられる。

4.4 建物への入力損失の予測

地盤から建物へ振動が伝わる時の入力損失については、既往の予測式を用いて、杭・耐圧盤形式の基礎に対する評価が可能である²⁾。

4.5 建屋内の伝搬予測

地下鉄振動が柱を通じて、建屋内を上階へ伝搬する際には、建屋の振動性状が伝搬性状に大きく影響しており、その予測に際しては、建屋平面の一部スパンに着目して作成した、各階1質点の多質点系モデルで精度良く予測できる²⁾。

この方法は、従来行なわれている距離減衰式を建屋内伝搬に当てはめる方法と比較して、建屋の振動性状を考慮できるという点で優れた予測方法であると考えられる。

4.6 床スラブによる増幅の予測

地下鉄振動が、各階で柱から床スラブに伝搬する際には、床スラブの1次固有振動数のみならず、地下鉄振動が卓越する40~80 Hzの高い振動数範囲にまでわたって、大きく増幅することが実測により示されている²⁾。

従って、その予測に際しては、質点モデルではなくFEMによるモデルを用いて、高振動数まで評価することが必要である。

4.7 固体音放射の予測

床版などからの電車固体伝搬音の放射については、地下鉄振動が卓越する振動数範囲は厳密には拡散領域として取り扱えない領域である。このような領域に対してはFEMモデルによる予測が可能であることを確認できたことは今回の研究成果である。ただし、固体伝搬音放射の予測については、水平振動による壁からの放射問題、構造体だけでなく天井材などの二次部材からの放射問題など複雑な問題は未解決であり、これらの問題に対する予測モデルの検討が今後の課題である。

5. おわりに

本研究では、地下鉄からの振動・固体伝搬音の建物内居室への影響について、地盤から建物に至る伝搬経路を追ってその予測手法について検討を重ねてきた¹⁾²⁾。その結果、ひとつの予測システムを構築し、この予測システムが地下鉄振動・固体伝搬音の予測を行なう際に有用なシステムであることを示した。今後更に、より厳密なモデル化の検討も含めてシミュレーションと実測を比較検討し、信頼性の向上を図っていきたい。

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) 吉原, 中村, 安井, 平野: 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 -, 大林組技術研究所報, No. 43, p. 21~28, (1991)
- 3) 縄岡, 平野, 他: 近鉄アート館の音響設計, 日本音響学会講演論文集, p. 647~648, (1989. 3)
- 4) 武田, 吉原, 他: 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究 (その1 地盤振動の伝搬性状について), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 401~402, (1988. 10)