

敷地近傍を地下鉄が走行する集合住宅の固体伝搬音対策

計画段階の固体振動予測と竣工後の検証

野中 康友* 宮川 忠明** 木田 寛治** 野本 利英**

Taking Measures on a Condominium for Structure Borne Noise caused by Nearby Subway Travel

Estimation of structure borne noise at the design stage and confirmation after completion of the new building
by Yasutomo NONAKA, Tadaaki MIYAGAWA, Kanji KIDA and Toshihide NOMOTO

Abstract

The issue of structure borne noise on buildings is increasing with the recent surge in condominium construction. In condominium projects in particular, an estimation of existing structure borne noise is required from the design stage. In this report, vibration measurements were carried out at the existing building to estimate the structure borne noise and we also took measures to assess the vibration caused by subway travel. Upon completion of the new building, vibration and noise measurements were carried out and it was confirmed that the structure borne noise had been completely eliminated by those measures.

要 旨

建物における固体伝搬音の問題は、最近のマンション建設ブームに応じて増える傾向にある。特に地下鉄近傍の集合住宅においては、その計画段階から地下鉄走行に伴う固体伝搬音の存在を予測し影響を把握する必要が求められている。本例では、計画段階において解体予定の既存建物の振動測定により固体音問題の存在を把握し、新築建物の入力損失効果による固体伝搬振動の予測を行い、防振対策を行った。その結果、建物の竣工後に行った振動測定により振動対策の有効性が確認できた。また、室内において騒音レベルを測定した結果、固体伝搬音の存在に気がつかないほど低いレベルであることが確認できた。

キーワード：固体伝搬音 / 振動 / 防振対策 / 距離減衰 / 低周波騒音 / 入力損失

1. はじめに

地下鉄の走行に伴って励起される振動は、地盤から建物の構造躯体を伝搬経路として、振源から離れた居室において低周波の騒音として知覚され、居住者にとって大きな問題となることがある。

こうした建物における固体伝搬音（以下、固体音）の問題は、最近のマンション建設ブームに応じて増える傾向にある。特に地下鉄近傍の集合住宅においては、その計画段階から固体音の存在を予測し影響を把握する必要が求められており、近年の重要な技術課題となってきた。

本報では竣工した集合住宅において、建物の近傍

を走行する地下鉄から振動伝搬する固体音の影響と防振対策の必要性および対策と効果について、その計画段階から検討し、可能な対策を講じると共に竣工後の測定による検証に至るまでの一連の検討を行う機会を得たので、その結果について報告する。

2. 建物・地盤概要

本敷地から約60m北側の地下（GL-5.0m～17.0m間）に地下鉄が走行している。また、更に北側には高速道路が高架で走っている。

都心部でかつ振動源が近くにある密集地域ではあるが、敷地周辺は比較的閑静な住宅街である。

* 建築本部技術部門

** 技術研究所環境研究室

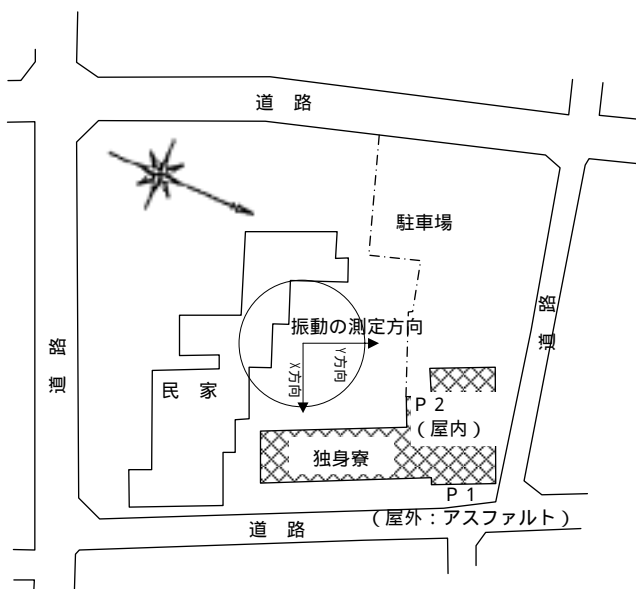


図1 既存建物の配置図

以下に建物の概要として、図1に既存建物の配置図を、図2に地下鉄との位置関係を明示した新築する建物の配置図および立面概要図を示す。更に、表1に敷地地盤のS波速度構造を示す。

既存建物（独身寮）の構造形式はRC造3階建て純ラーメン構造杭基礎、新築する建物はRC造壁梁・壁柱形式の9階建ての共同住宅である。

表1 敷地地盤のS波速度構造

| 層番号 | 深度 (m) | 層厚 (m) | 密度 (g/cm ³) | S波速度 (m/s) | ポアソン比 |
|-----|--------|--------|-------------------------|------------|-------|
| 1 | 4.50 | 4.50 | 1.35 | 110 | 0.283 |
| 2 | 10.60 | 6.10 | 1.50 | 160 | 0.494 |
| 3 | 12.15 | 1.55 | 1.80 | 330 | 0.480 |
| 4 | 14.20 | 2.05 | 1.70 | 330 | 0.480 |
| 5 | 15.90 | 1.70 | 1.80 | 330 | 0.480 |
| 6 | 17.90 | 2.00 | 1.70 | 290 | 0.485 |
| 7 | 19.70 | 1.80 | 1.80 | 290 | 0.485 |
| 8 | 24.50 | 4.80 | 1.70 | 250 | 0.489 |
| 9 | 25.55 | 1.05 | 1.85 | 450 | 0.454 |
| 10 | 32.10 | 6.55 | 2.00 | 450 | 0.454 |
| 11 | 35.00 | 2.90 | 1.90 | 440 | 0.456 |

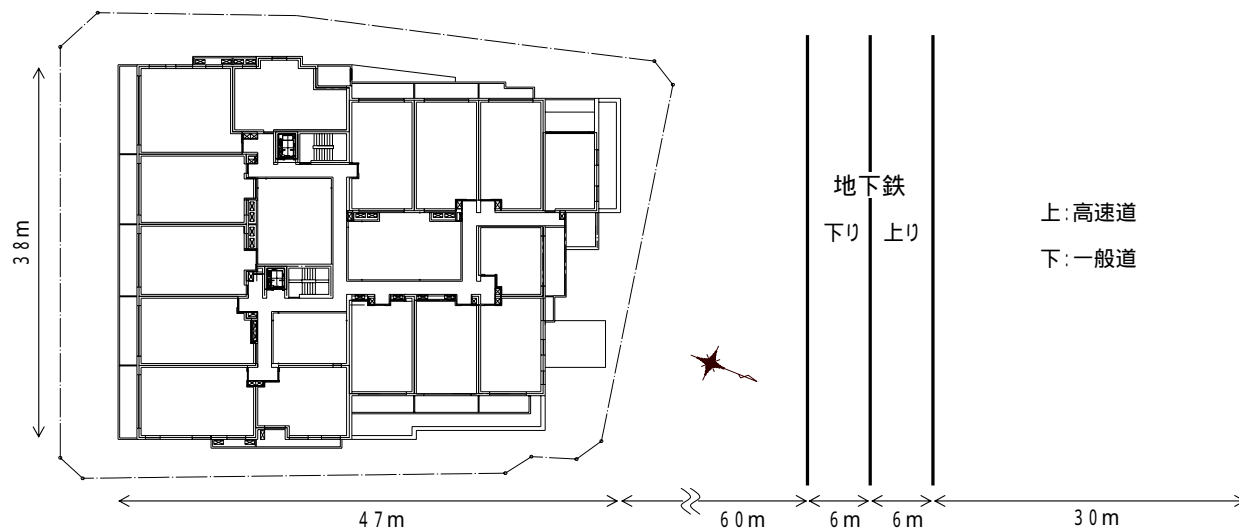
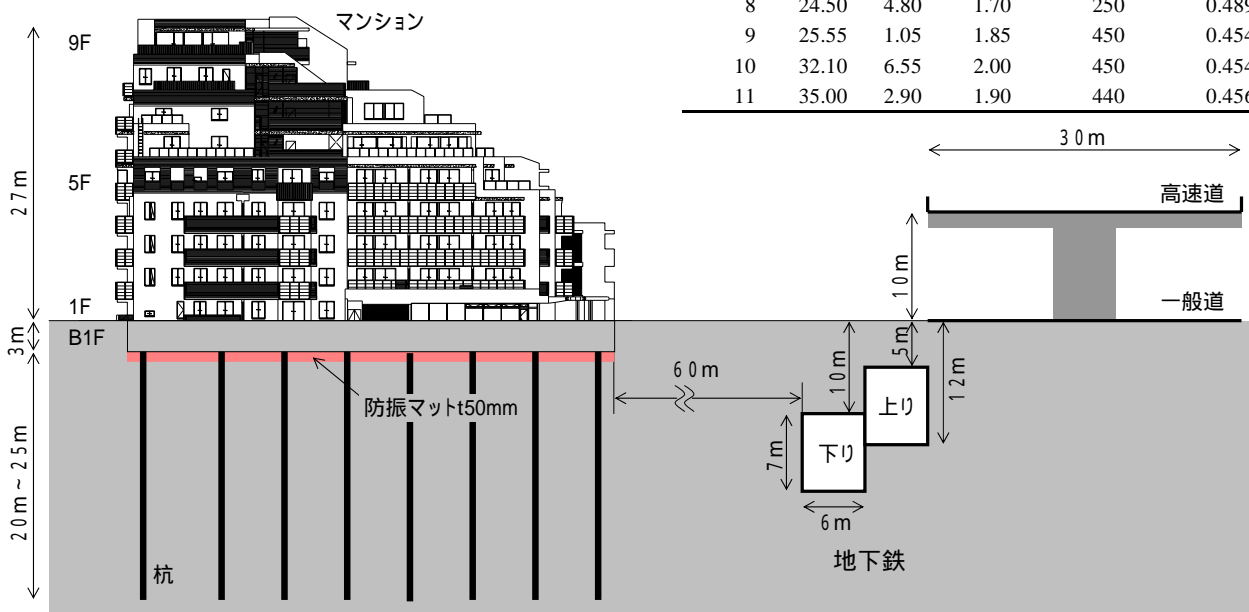


図2 新築する建物の概要図（上：断面概要図，下：配置図）

3. 計画時の状況

解体前のRC造3階建て独身寮の1階食堂において計測した地下鉄通過時における室内騒音レベルの分析結果を図3に示す。

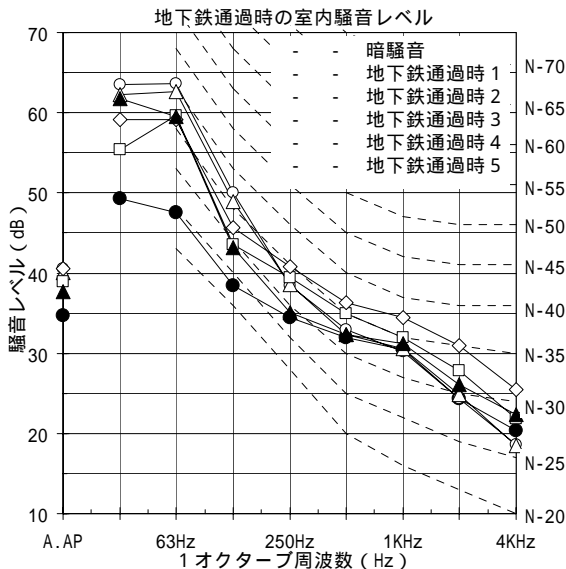


図3 地下鉄通過時の室内騒音測定結果

結果は騒音レベル40dB[A]，評価値N - 40となっている。これは(社)日本建築学会編『建築物の遮音性能と設計指針』によれば，一般的な性能水準である室内騒音レベル等級の2級に該当している。

このように騒音レベルだけの評価では『一般的な性能水準』であるが，一方明瞭度については，測定結果における暗騒音との差は5dB[A]ある。一般に暗騒音との差が10dB[A]を超えると苦情の発生率が高くなる傾向にあるとの指摘があり，従って本計画では苦情発生率の確率は少ないものと思われるが，測定時間帯は昼間であり，夜間では暗騒音がもう少し下がると予想されることから騒音レベルの差も5dB[A]を上回るものと考えられる。

また，周波数別に見てみると31.5Hzおよび63Hz成分（一部125Hz成分）では，暗騒音よりも10dB以上大きな値を示しており，騒音レベル自体は小さく一般的なレベルではあるものの地下鉄の走行を認識できる状態にあることは明確である。

また，屋外および屋内で行った振動測定の結果を図4～5に示す。いずれも地下鉄通過時振動の大きい方の値から5本の平均値で示している。

図よりいずれの振動成分も31.5Hz超の周波数成分が優勢である。この周波数帯域の水平方向の振動成分は，電車通過時の値で10dB前後の入力低減効果

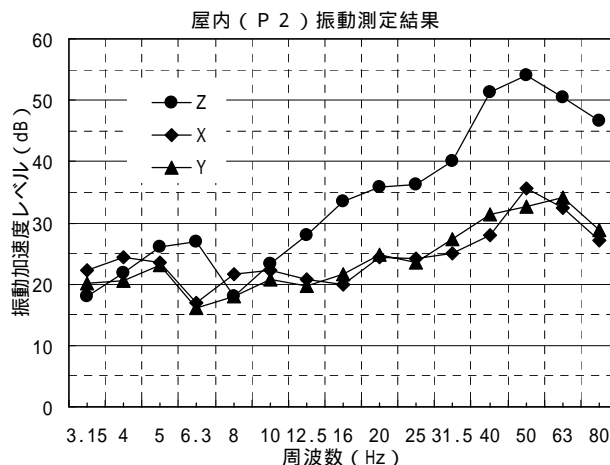
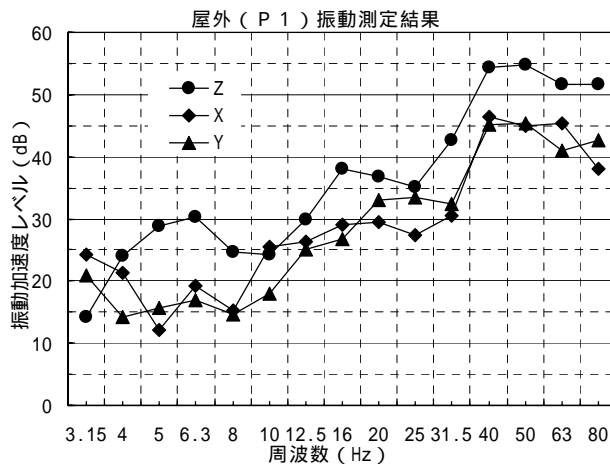


図4 振動測定結果

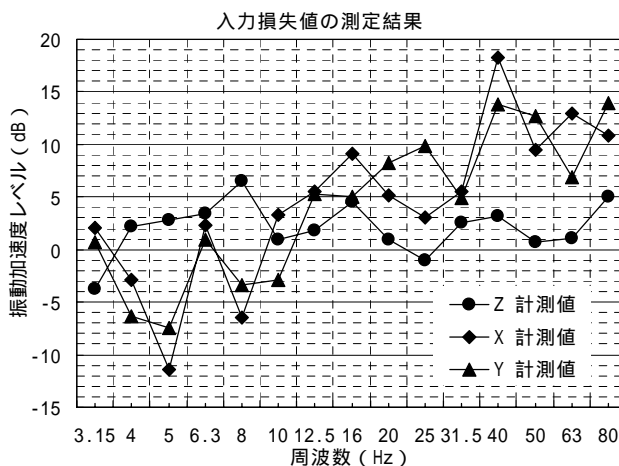


図5 入力損失値の測定結果

が見られるが，鉛直方向の振動成分は0～5dB以下の低減に留まっている。

表2は，1/3オクターブバンド分析結果を集計して

| | 屋外(dB) | 屋内(dB) |
|-----|--------|--------|
| X方向 | 51 | 39 |
| Y方向 | 50 | 39 |
| Z方向 | 60 | 58 |

OA値に換算した値である。この値でも水平方向の振動成分は、電車通過時の値で10dB前後の入力低減効果が見られるが、鉛直方向の振動成分は2dB程度の低減効果に留まっている。

以上の測定結果から、何らかの固体音対策を実施するか否か、微妙な判断を迫られることとなったが、以下に述べる対策について、コスト・工期を考慮の上で、実施するに至ったものである。

以下の内容は、鉛直方向振動についてまとめたものである。

4．固体伝搬音対策の概要

固体伝播音による室内騒音の計算式は、一般的に下式(1)~(2)によって表される。

$$SPL = VAL - 20\log(f) + 10\log(k) + 10\log(S_{ef}/A) + 36 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$VAL = VAL_{gs} - L_{sg} - L_{rs} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- SPL：対象室内の音圧レベル[dB]
- VAL：床面の振動加速度レベル[dB]
- f：振動数[Hz] k：音響放射係数
- S_{ef}：振動面の有効放射面積[m²]
- A：室内の吸音力[m²]
- VAL_{gs}：地表面の振動加速度レベル[dB]
- L_{sg}：地盤から建物への伝播に伴う振動減衰（入力減衰）[dB]
- L_{rs}：躯体における振動低減工法による振動減衰[dB]

計画建物において振動低減対策を施さない場合、既存建物と異なるのは、(2)式中の L_{sg}（入力減衰）のみである。入力減衰の評価式として、波長と建物基礎の長さにより決まる入力損失理論に基づく以下の式(3)を利用する。

$$\eta = \frac{X}{X_0} = R \times \left| \frac{V_s}{\pi B f} \sin \left(\frac{\pi B f}{V_s} \right) \right| \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、η：地動と基礎との振幅比

V：波動の伝搬速度

B：基礎板の長さ、 f：振動数

R：入力損失効果低減係数

振動低減対策工法として、現実的に可能な対策は基礎底盤に緩衝材を敷設することである。これによる振動低減効果は、以下の重複反射理論に基づく式(4)を利用する。

$$\tau = \frac{|u_t|}{|u_i|} = \frac{4}{\sqrt{(1+\alpha_{12})^2(1+\alpha_{23})^2 + (1-\alpha_{12})^2(1-\alpha_{23})^2 + 2(1-\alpha_{12}^2)(1-\alpha_{23}^2)\cos\frac{2\omega H}{V_2}}}$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\rho_j V_j}{\rho_i V_i} \quad \dots\dots\dots (4)$$

これは図6に示すような波動インピーダンス V が異なる互いに平行な三つの層からなる系において、波動が層から層へと通り抜ける時、入射波の振幅 |u_i| と透過波の振幅 |u'_t| との比を変位波動伝達率として、重複反射理論に基づき表したものである。

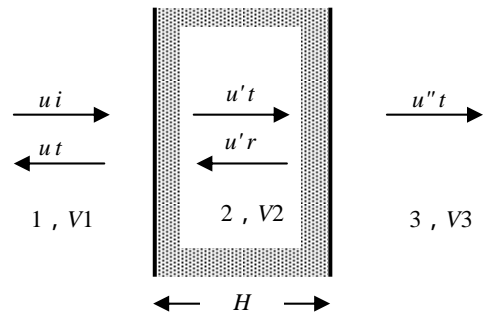


図6 波動伝搬の概念図

これらの知見や式を用いて、計画する建物の地下鉄による固体音を検討する。

4.1 入力損失による振動低減効果

建物規模の相違によってもたらされる振動低減効果を把握する。(1)式において既存建物との相違は、S_{ef}(振動面の有効放射面積)とA(室内吸音力)のみである。ここではこれらの値がほぼ同じと仮定して、RC造3階建ての既存建物における測定結果を元に、(3)式より入力損失値を求める。

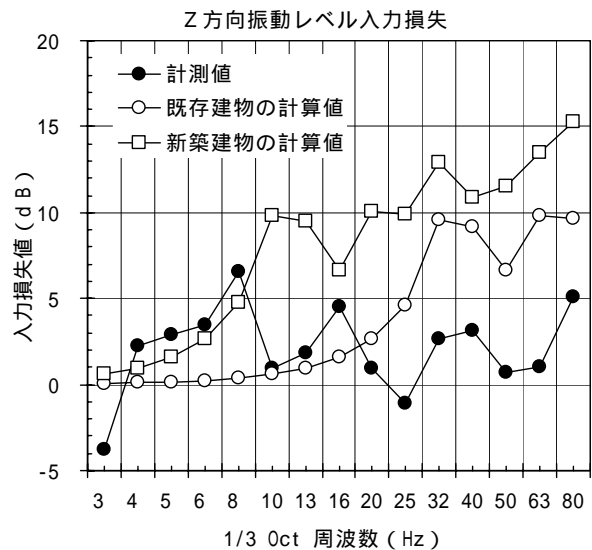


図7 鉛直方向振動の入力損失レベル

計算の条件は以下とした。

既存建物の平面形状：X × Y = 8m × 29m

地盤調査結果を元に、GL-17.0m位置までの平均せん断波速度210m/sを用いる。

計画建物の平面形状：X × Y = 47m × 38m

(3)式中の基礎の長さBは水平成分では基礎の短辺長さ、鉛直成分では基礎の剛性を考慮し、その50%が有効と仮定した。またRは、一般的に水平振動で1.0、鉛直振動で概ね0.5程度とされている。図7に入力損失の値を実測値と比較して示す。

図7の結果より、概ね建物規模の影響により改善される入力損失値はZ方向振動について既存建物に比べて概ね5.0dB程度向上することが期待できると思われる。

ただし既存建物の実測値とは整合性が極めて悪く、特に30Hz以上の高周波数域では、もう少し高い値が出るとの一般的な予想を裏切るものであり、次の項で述べる防振対策は必要であると判断した。

4.2 防振対策による振動低減効果

ここでは(2)式中の L_{rs} (振動低減工法による振動減衰)の項について、(4)式の重複反射理論に基づき鉛直方向振動対策としてマットスラブ下面に防振対策を施工する場合の対策効果を予測する。

使用する各材料の音響抵抗(インピーダンス)を表3に示す。

表3 材料のインピーダンス

| 物性資料 | 土 | 発泡ポリオレフィン | コンクリート |
|---------------------------|--------|-----------|--------|
| 密度 (kgf/cm ³) | 0.0016 | 0.000062 | 0.0024 |
| 速度 (cm/s) | 26000 | 36600 | 310000 |

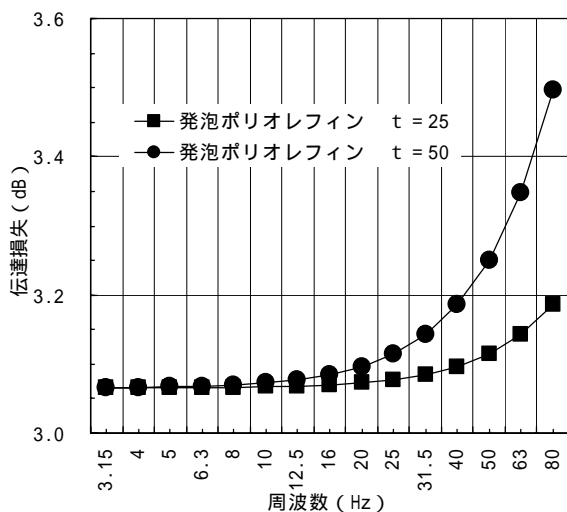


図8 敷設材料毎の周波数別振動絶縁効果比較

建物は直接基礎ではなく杭基礎であることから絶縁効果が大幅に損なわれるものと推察される。従って、計算に当たっては、結果を一般的な値として7割低減して用いることとする。

図8は、横軸を周波数に、縦軸を伝達損失 (dB) として、計算結果を検討ケースごとに示したものである。

図からわかるように、発泡ポリオレフィンの厚みを変えて伝達損失を計算した結果、厚みを厚くしても最大で0.3dB程度の差しかない。これは効果を7割低減して評価していることも結果に大きく影響しており、本建物では少しでも伝達損失効果の大きい方を採用することとし、厚み50mmを採用することとした。

5. 躯体竣工後の振動測定結果

図9に施工中の防振マットを示す。



図9 敷設施工中の防振マット

図10に振動測定点案内図を示す。なお、以下の振動測定結果の1/3オクターブ分析値は全て鉛直振動5波の平均値で評価したものである。

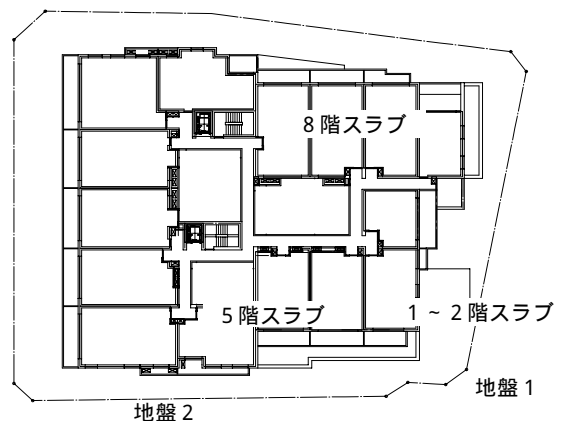


図10 振動の測定点案内図

5.1 地盤振動の距離減衰

やや本論から外れるがここでは、測定点は少ないものの地盤振動の同時測定を行った結果について、既往の距離減衰式と比較してその適用性について得られた知見をまとめる。

既往の距離減衰式としては、以下に示す幾何減衰式(5式)と経験式(6式)とがある。

$$\frac{u}{u_0} = e^{-\lambda r} r^{-n}, \quad \lambda = \frac{2\pi h f}{V} \quad \dots\dots\dots(5)$$

- u_0 : 振源における振幅
- u : 震源からの距離 r における振幅
- n : = 2 : 半無限体の自由表面を伝播する実体波
- = 1 : 無限体を伝播する実体波
- = 0.5 : 表面波
- V : 波動の伝播速度
- h : 地盤の減衰定数

$$\Delta L = -20n \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) - 8.68h(r - r_0) \quad \dots\dots\dots(6)$$

- r_0 : 振源から基準点までの距離(m)
- r : 振源から測定点までの距離(m)

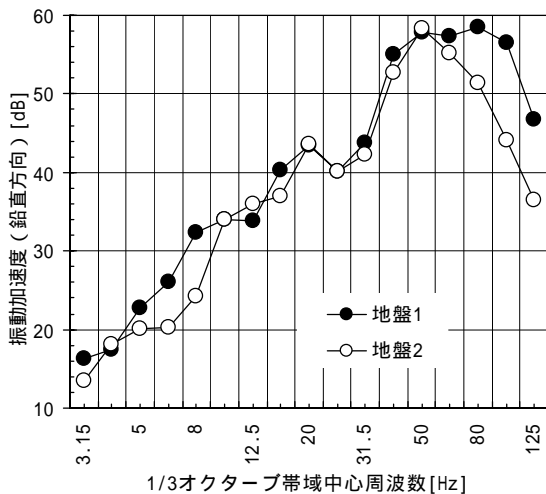


図 11 地盤振動の測定結果

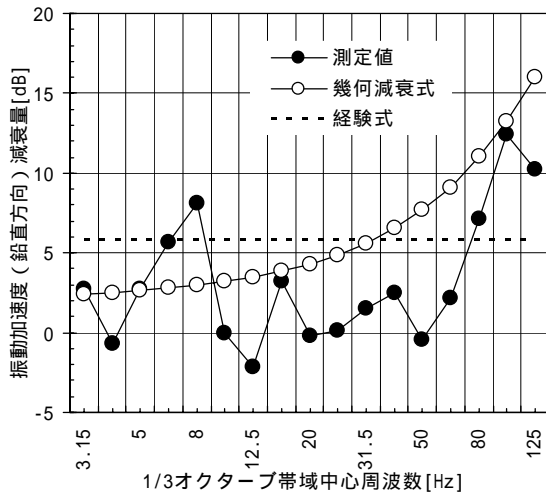


図 12 地盤振動距離減衰量の比較

図11に測定結果を、図12に距離減衰量の測定結果と(5式),(6式)による値とを比較して示す。式に用いた値は、上下線の軌道中心から地盤1測定点までの距離 $r = 70\text{m}$ 、同じく地盤2測定点までの距離 $r_0 = 113\text{m}$ 、 $n = 0.5$ 、 $h = 0.01$ とした。

同時測定という条件の下で、測定点が少なかったため距離減衰特性に関する明瞭な知見は得られなかったが、本測定において減衰特性は概ね理論曲線の傾きに合致する傾向が得られた。ただし、減衰量は理論式を下回る値であった。これは、地下鉄振動以外の交通振動などの影響が影響しているものと考えられる。

また、経験式による距離減衰量は理論式と計測値との中間的な値として概要を把握するのに概ね妥当な傾向を示していると考えられる。

5.2 入力損失効果

先の図10に示す測定点より、地盤1測定点と1階ス

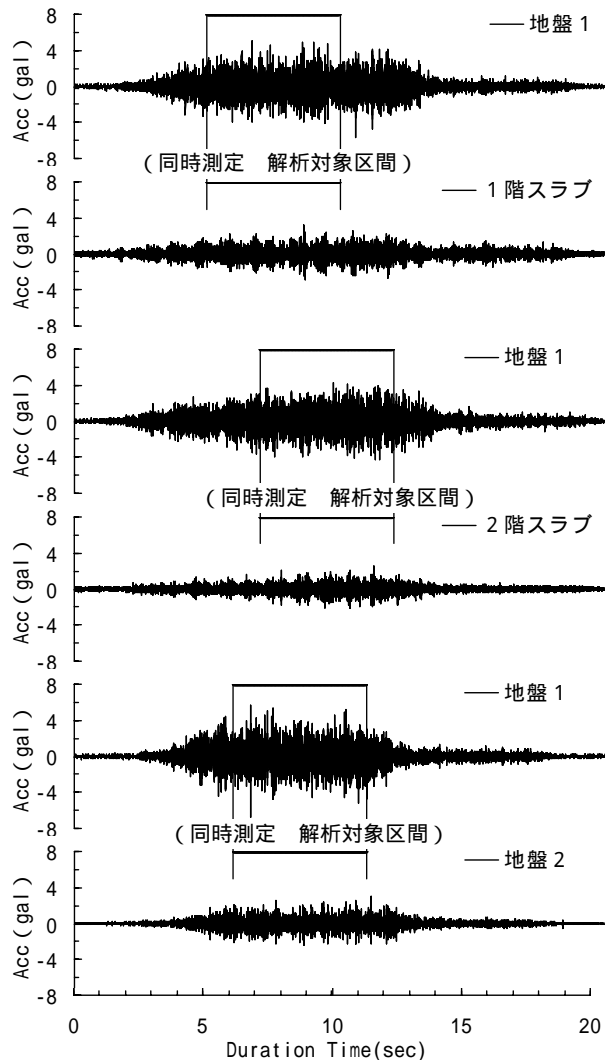


図 13 地下鉄走行時 各点の振動加速度波形

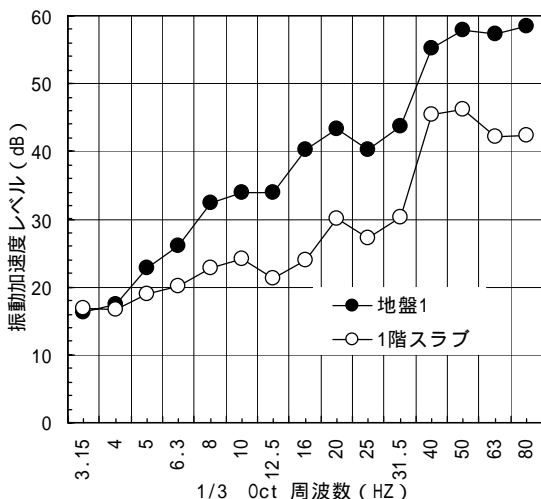


図 14 振動測定結果

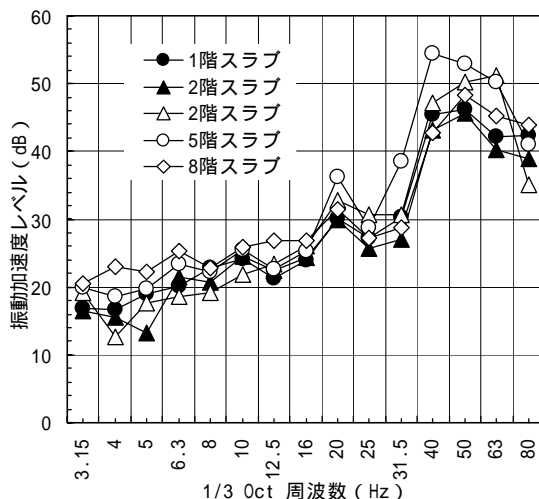


図 16 建物内部の床振動測定結果

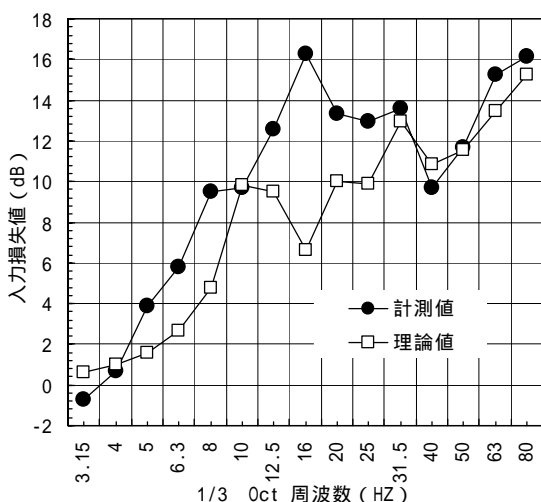


図 15 地盤振動の入力損失値

ラブ測定点の結果を利用する。図13に測定結果の振動加速度時刻歴波形の例を示す。

図14に振動測定結果を、図15に測定結果に基づく入力損失値を示す。

入力損失効果は、31.5Hz以上の高周波数帯域では計測値と理論値がほぼ合致しているが、それ以下の低周波数帯域では計測値が理論値を上回る大きな入力損失効果をもたらしている。この値には、防振材の寄与も幾分含まれているものと考えられる。

5.3 建物内部の振動距離減衰効果

図16に建物の内部振動測定結果を示す。図中の黒塗りマークの測定結果と白抜きマークのそれとは、測定日が異なっている。

建物内部振動の距離減衰式は、点加振解を拡張した式などがあるが、測定結果に示すように計測値には測定場所や周波数にばらつきが見られ、顕著な距

離減衰特性は見られなかった。

6 建物竣工後の騒音測定結果

建物の竣工後に地下鉄走行時の室内騒音レベルを測定した。測定点を図17に、測定結果を図18、測定結果の一覧を表4に示す。

地下鉄通過時の室内騒音レベルは暗騒音レベルと同レベルであり、耳で聞き取ることはできなかった。103室洋室1測定点は地階であることから、他の室より小さいレベルとなっている。評価値は、暗騒音も地下鉄走行時ともに103室洋室1測定点はN - 20、その他の居室はN - 30であった。

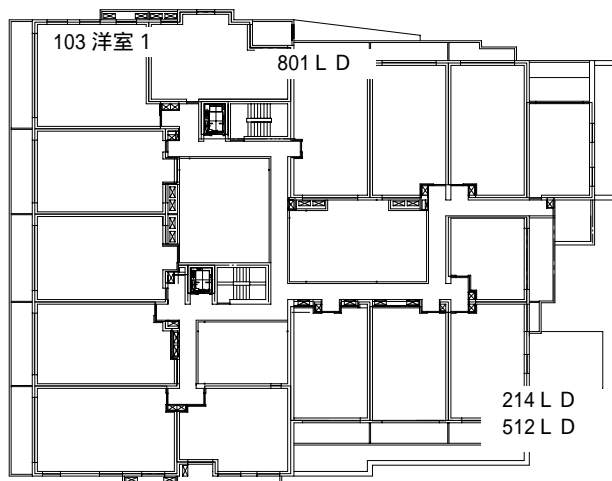


図 17 室内騒音レベルの測定点

表 4 騒音レベル測定結果一覧

| | 103号室 洋室 1 | 214号室 L D | 512号室 L D | 801号室 L D |
|------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| 室内騒音レベル dB[A] | 21 | 31 | 30 | 31 |
| 暗騒音レベル dB[A] | 21 | 30 | 29 | 30 |

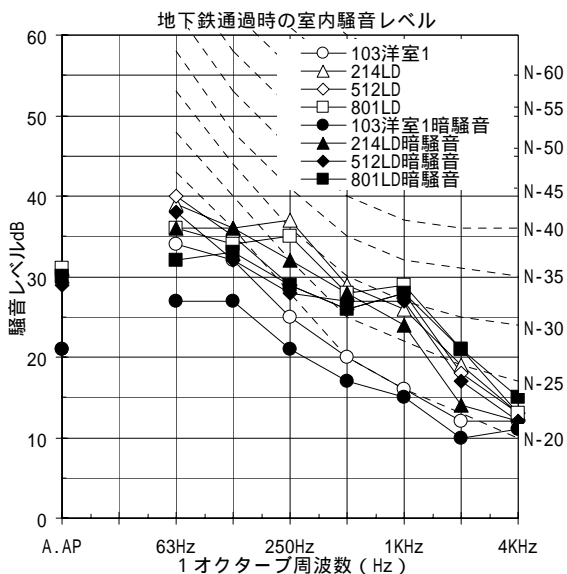


図 18 室内騒音レベルの測定結果

7. まとめ

防振材発泡ポリオレフィンマットを耐圧板下に敷設する程度しか対策を講じることはできなかったが、結果はきわめて良好な振動遮断性能を得ることができた。建物竣工後に行った居室での地下鉄走行時の騒音レベルも暗騒音との差が明瞭に判別できないほど静寂な状態を実現できた。

これは入力損失効果として予想以上に大きな値が得られたことが主な要因であると考えられる。

また、既往の距離減衰式や内部振動の距離減衰式について一例ではあるが、適応性に関する知見を得ることができた。

今後は、より詳細な解析的検討を行い、固体音問題の予測精度向上につなげる予定である。また、杭基礎における防振マットの定性的な振動低減効果について、引き続き今後の課題として検討を継続する予定である。

参考文献

- [1]山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社，1976
- [2]日本建築学会：建築物の遮音性能基準と設計指針(第二版)，1997.12
- [3]日本音響材料協会：騒音・振動対策ハンドブック，1982.1