

地下鉄振動の近接建物への伝搬

Propagation of Subway Vibration to Buildings

石井 聖光*・橘 秀樹*・今西由利**

Kiyoteru ISHII, Hideki TACHIBANA and Yuri IMANISHI

地下鉄の振動が近接した建物に伝搬し、建物内部で騒音となる問題について、実測調査を行った結果をとりまとめて報告する。調査は都心部で地下鉄に近接している各種構造の建物9つを対象として選び、列車走行時の振動ならびに騒音を同時に測定した

1. ま え が き

地下鉄は、地表を専有することなく大量の輸送力を発揮する交通機関であり、これによって我々は多大な交通の利便を得ている。

しかし過密化した都市部では、地下鉄の隧道構築と周辺の建物が接近した位置関係となることが多く、固体音の問題、すなわち列車走行による振動が地盤を介して建物に伝わり、建物内部で居住性に影響を与える振動あるいは騒音の問題となっている例が多い。

このような問題に対して、影響の定量的な予測あるいは適切な対策を行うためには、振動源から建物に到る振動の伝搬性状を明らかにする必要がある。

図-1は地下鉄が振動源となるとききの固体音の問題を図式的に表したもので、段階的にみれば、振動の発生、地盤中の伝搬、建物への入力、建物構造体中の伝搬、建物内部での音の放射などに分けられる。

筆者らは、環境騒音・建築音響の立場からこの種の問題の研究を進めているが、そのための基礎的検討として、ここ数年間、営団地下鉄を対象として隧道構築およびそれに近接する各種構造の建物における地下鉄振動の実態を実測によって調査してきた。^{1),2),3),4)}ここではそれらの結果を整理し、若干の考察を加えて報告する。

2. 隧道構築の振動 (振動源の特性)

2-1. 走行列車の差による隧道構築振動の変化

車輪がレールの上を転動することにより振動が発生し、その振動が枕木を介して隧道構築に伝わる。

そこでまず、振動源である走行列車の違いによって発生振動がどの程度変化するかを調べるために、多数の列車走行について隧道構築各部の振動を測定した。測定対象とした隧道構築は後に述べる H ビルの前面道路直下

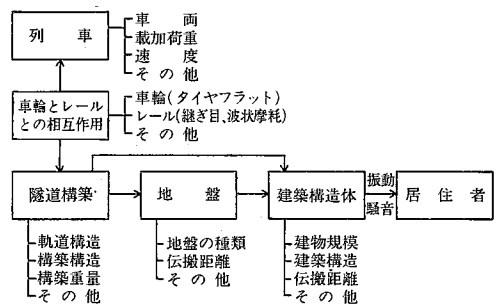


図-1 地下鉄振動伝搬の概念図

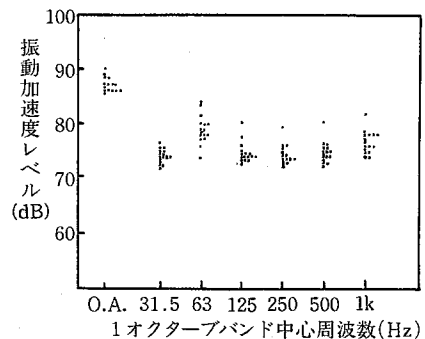


図-2 多数の列車走行による隧道構築床での振動

を通る地下鉄日比谷線の構築である。構築構造は箱型断面のラーメン構造、軌道構造は直結コンクリート道床である。これらの測定結果のうち、隧道構築の下床で測定した1オクターブバンドごとの振動加速度レベル (基準 10^{-5}m/s^2) を図-2に示す。(ただし本稿で述べる地下鉄振動の測定・分析方法はすべて付録 I に示すとおりである)。各周波数とも、測定値にはかなりのばらつきがある。地下鉄振動の特性を決定する列車側の要因としては、車輪やレールの条件 (タイヤフラット、レールの波状摩耗の有無)、車両の種類、載加荷重、走行速度などが考えられるが、この測定では車両の種類はほぼ一定に限られ、タイヤフラット等の著しい列車はなかった。

* 東京大学生産技術研究所 第5部

** 大同工業大学

そこで走行速度の別に、振動加速度レベルを整理してみた、その一例として図-3 に 125 Hz (1 オクターブバンド) の結果を示すが、明らかに速度依存性、すなわち走行速度が大きくなるほど振動レベルが大きくなる傾向が認められる。

このように、列車走行時の隧道構築振動のばらつきは、特殊な例を除けば数 dB である。その原因としては、主として走行速度の違いと考えられる。そこで、以下に示す測定結果は特殊なものを除いた標準的と考えられる列車 5~10 本についての平均値とする。

2-2、列車走行による隧道構築の振動

隧道構築の振動は、列車側の要因のほかにも、軌道構築、構築構造、周囲の地盤などにより異なるが、ここではまず標準的な地下鉄構築での測定結果を示し、列車走行時の構築各部の振動特性について一般的な傾向を述べる。

隧道構築は深層部ではシールド工法による円形断面のものも用いられているが、一般には箱型断面のラーメン構造が多く採用されている。測定対象とした構築は後に述べる H ビルの近傍を通る地下鉄日比谷線の構築で、図-6 に示すとおり標準的な箱型断面である。軌道は現在地下鉄では最も一般的な直結コンクリート道床である。この日比谷線の隧道構築において、約 16 m 離れた 2 つの断面 S-1、S-2 をとり、それぞれの床、壁、天井各 1 点を測定点とした (ただし S-2 付近は引き込み線があるため、レールに継ぎ目がある)。図-4 に測定結果を示すが、この結果から列車走行による隧道構築の特性として次のことが言える。

(1) この種の隧道構築の振動加速度は、高周波成分を含む広帯域なスペクトルであるが、63 Hz の帯域成分が卓越する傾向がある。ただしレールの継ぎ目付近では、高周波数成分のレベルが大きくなる。

(2) 振動の入力位置である構築下床から離れるにしたがって、すなわち壁、天井の順に床に比べて振動レベルが小さくなる。また伝搬に伴う減衰は高い周波数成分ほど大きいため、振動入力点から離れるにしたがって 63 Hz の周波数成分の卓越が顕著になる。

なお、上記の傾向は他の構築での測定結果においても同様である。

2-3、軌道構造の違いによる隧道構築振動の変化

レールを枕木を介して支持する道床は、コンクリート道床と砂利 (バラスト) 道床に大別できるが、地下鉄では保守管理の上からコンクリート道床が多く用いられている。その上にコンクリート枕木でレールを直接支持した構造を直結コンクリート道床という。

この直結コンクリート道床は建設あるいは保守の上で極めて有利であるが、列車走行による振動の発生が大きくなり、問題を生じていることが多い。近年では隧道構築の

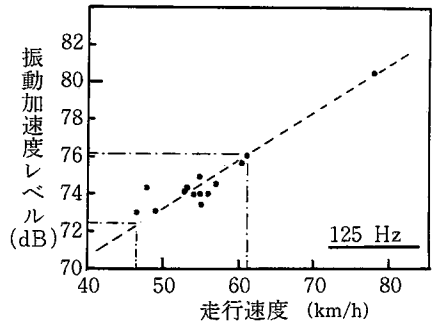


図-3 列車の走行速度と隧道構築床の振動との関係

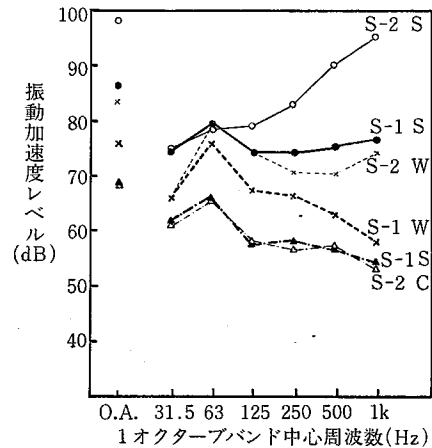


図-4 列車走行時の隧道構築の振動

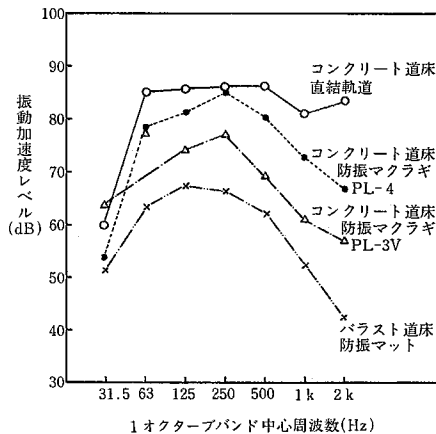


図-5 各種軌道構造の隧道構築下床での振動

下床とコンクリート枕木の間に防振材を介した軌道構造や、バラスト道床の下にさらに防振ゴムを敷きつめた軌道構造など、種々の防振軌道が開発されてきている。^{5),6)}

図-5 に、地下鉄有楽町線で採用された各種の軌道について、列車走行時の隧道構築下床の振動を測定した例を示す。⁹⁾ このように振動発生源側の軌道構造によって、隧道構築の振動の大きさおよびスペクトルはかなり変化する。

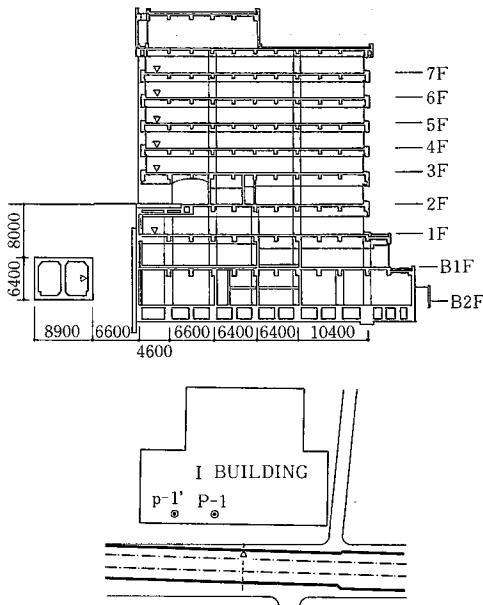


図-6 Iビルと隧道構築の平面および断面図

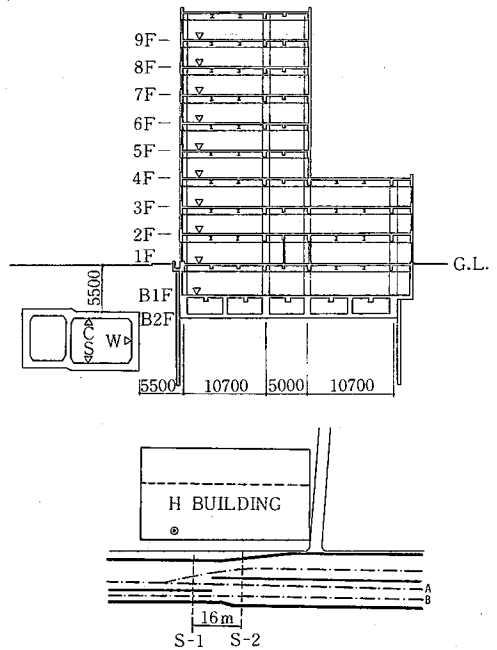


図-7 Hビルと隧道構築の平面および断面図

3. 建物内における地下鉄振動と騒音の特性

3-1. 測定内容

地下鉄構築に近接した建物 9 例について、列車走行時の振動および騒音についての実測調査を行った。測定対象とした建物および地下鉄構築は表-1 に示すとおりである。

建物の構造は、鉄筋コンクリート (R. C.) 造 1 例、鉄骨鉄筋コンクリート (S. R. C.) 造 4 例、鉄骨 (S) 造 4 例であり、すべてラーメン構造である。これらの建物は事務所あるいは店舗として使用されているため、比較的時間仕切り壁が少ない。

地下鉄構築は、G ビル近傍の半蔵門線以外は標準的な箱型断面のラーメン構造であり、軌道にもバラスト道床以外には特別な防振対策が施されている箇所はない。

これらの測定対象のうち I ビル、H ビル、T ビルについては、建物および構築の平面図、断面図をそれぞれ図-6、図-7、図-8、に示す。

建物と隧道構築の位置関係は、C ビル以外は図-6~8、に示すように地盤を介してほぼ並行であり、構築壁から建物壁までの水平距離 (r) は表-1 に示すとおり数 m~十数 m である。C ビルについては、建物直下の銀座線とは壁、天井の部分は分離されているが、低部で連続しており、丸ノ内線とは伸縮継目を介して通路でつながっている。

建物側での振動測定点は、梁間中央の床スラブ上とし、可能な限り、各階において平面的にみて同一となる箇所とした。隧道構築側の建物外壁から測定点までの水平距

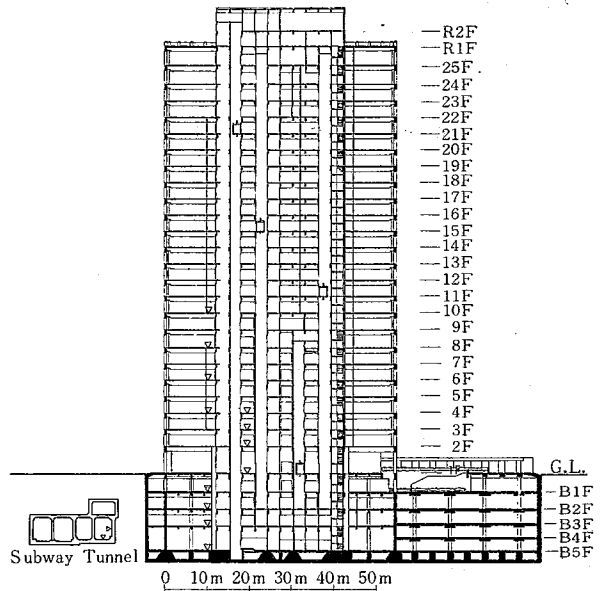


図-8 Tビルと隧道構築の平面および断面図

表-1 測定対象とした建物と地下鉄構築

建 物				地 下 鉄			
仮 称	階 数	構 造	d(m)*1	r(m)**	仮 称	構造・軌道の構造	土被り 測定点
Iビル (図-6)	地下2階～地上8階	SRC造	2.3	6.6	日比谷線	箱型断面 直結コンクリート道床	8.0 床・壁・天井
Kビル	地下1階～地上6階	RC造	11.0	9.0	丸ノ内線	箱型断面 バラスト道床	5.5 壁
Hビル (図-7)	地下1階～地上9階	SRC造	1.8	5.5	日比谷線	箱型断面 直結コンクリート道床	5.5 床・壁
Nビル	地下3階～地上3階	SRC造	24.0	6.5	日比谷線	"	7.0
	地上4階～地上18階	S造			"	"	
Cビル	地下3階～地上1階	SRC造	6.0	12.0	丸ノ内線	"	6.0
	地上2階～地上9階	S造			銀座線	"	
Gビル	地下4階～地上1階	SRC造	6.0	8.0	銀座線	"	6.0
	地上2階～地上19階	S造			半蔵門線	単線シールド 直結コンクリート道床	
Qビル	地下2階～地上9階	SRC造	4.0	17.0	東西線	箱型断面 直結コンクリート道床	11.0
Bビル	地下2階～地上9階	SRC造	11.0	10.0	銀座線	"	2.5 床・壁
Tビル (図-8)	地下4階～地上1階	SRC造	14.0	7.0	千代田線	"	19.1 床・壁
				図-8	三田線	"	19.1

* 1. 地下鉄構築側の建物外壁からの測定点までの水平距離
* 2. 建物外壁から地下鉄構築壁までの水平距離

離 (d) を表-1 に示す。ただし T ビルについては、建物の使用上の関係から図-8 に示すように一部測定点がずれている。また振動の測定点の直上 1.2 m の位置で騒音の測定を行った。

ほぼ半数の建物については建物側での測定と同時に、地下鉄構築側でも測定を行った。測定点は表-1 に示すとおりである。

3-2. 列車走行時の建物床スラブの振動

各建物における列車走行時の振動加速度レベル (オーバーオール) の一例を図-9 に示す。ただし図示した値は、各建物の地下階あるいは 1 階での測定値のうち最もレベルの大きなものである。建物は左側から順に隧道構築からの水平距離 r が短いものである。隧道構築、建物構造などが異なるため一概に比較はできないが、他の建物に比

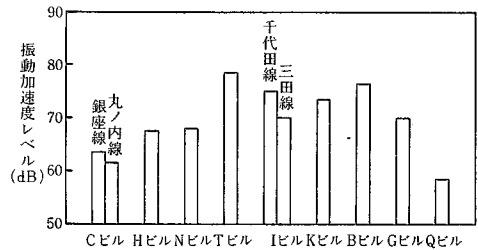


図-9 各建物における列車走行時の床スラブの振動(オーバーオール)

べて r が大きい Q ビルではレベルが小さく、r, d とともに小さい I ビルではレベルが大きい。また C ビルでのレベルが小さいのは、C ビルの直下が駅であるため列車の走行速度が小さいことと、隧道構築と建物を分離した効果

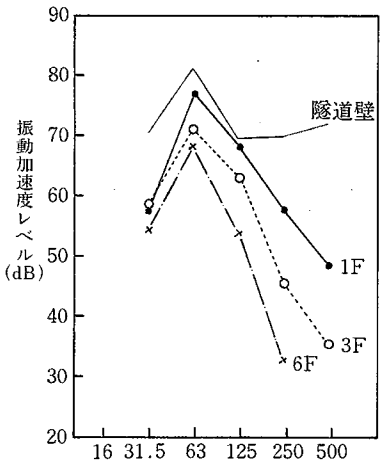


図-10 Iビルにおける列車走行時の床スラブの振動(オーバーオール)

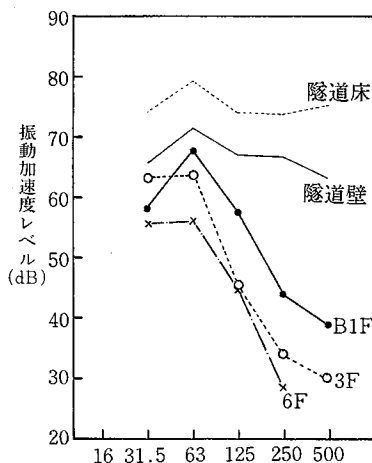


図-11 Hビルにおける列車走行時の床スラブの振動(オーバーオール)

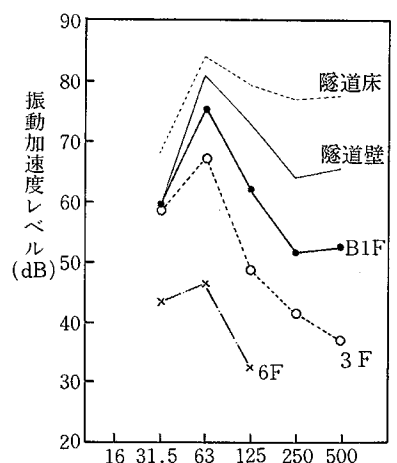


図-12 Tビルにおける列車走行時の床スラブの振動(オーバーオール)

によるものと考えられる。

列車走行時の床スラブの振動加速度の周波数特性を整理した結果の中から I ビル, H ビル, T ビルにおける結果を図-10~図-12 に示す。なお図中の細線は、比較のために隧道構築側での振動の測定結果を示したものである。床スラブの振動特性については、床スラブ自体の共振特性を調べるために、重量衝撃 (人間のとびはね) による床の加速度応答の測定を行った。このうち I ビル C ビルにおける測定結果を図-13, 図-14 に示す。図-10~図-12 から明らかなように、列車走行時の床スラブの振動は 63 Hz あるいは 31.5 Hz の成分が卓越している。この傾向は他の建物でも同様であった。これは、(1) 前述のように隧道構築の振動が 63 Hz の帯域で卓越している、(2) 建物に至るまでの伝搬過程で高周波成分ほど減衰が大きい、(3) 図-13, 図-14 にみられるように床スラブ自体がこの周波数帯域で励振されやすい、という 3 つの条件によるためと考えられる。

地下階と地上階の床スラブでの振動加速度のスペクトルを比較すると、前者では 63 Hz の帯域での卓越が顕著であるのに対して、後者では相対的にみて 63 Hz 以下の低周波数成分も大きくなっている。これは図-14 から明らかなように一般的に地下階の床スラブは有効質量が大きく剛性が高いために、上階に較べて固有振動数が高いこと、建築構造体中での振動伝搬過程においても高い周波数成分ほど減衰が大きいためと考えられる。

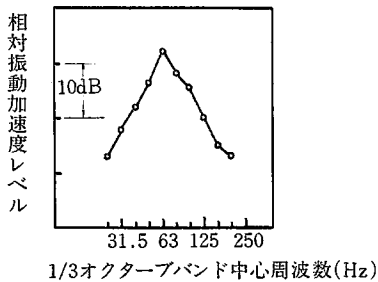


図-13 床スラブの共振特性 (I ビル)

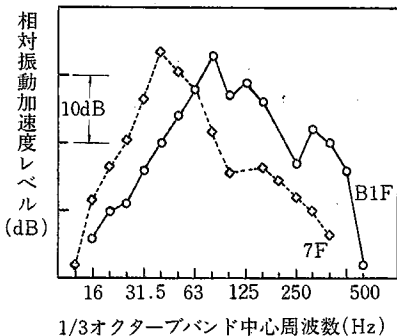


図-14 床スラブの共振特性 (C ビル)

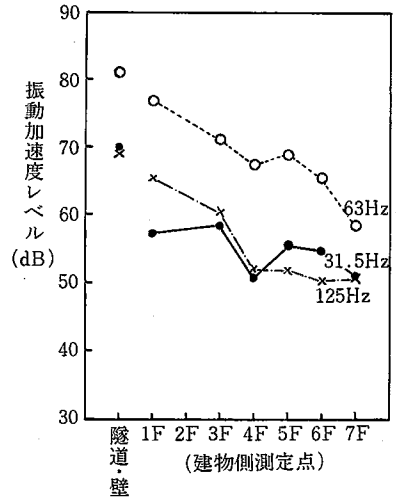


図-15 I ビルにおける垂直方向の振動加速度レベル分布

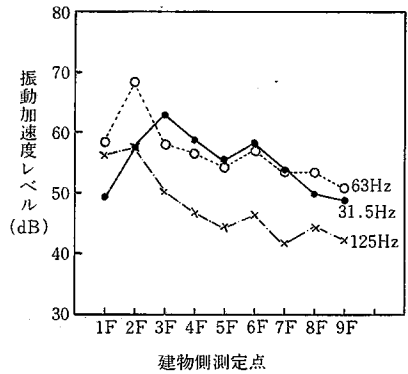


図-16 H ビルにおける垂直方向の振動加速度レベル分布

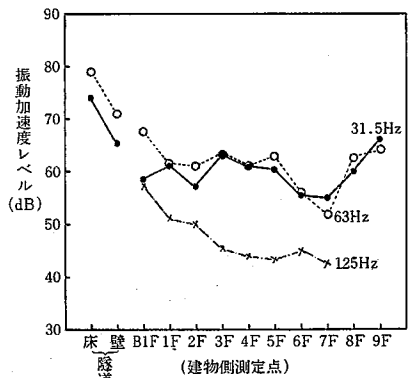


図-17 C ビルにおける垂直方向の振動加速度レベル分布

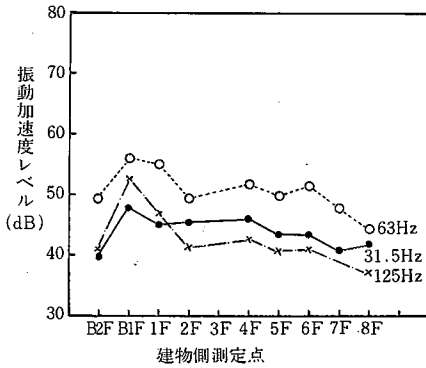


図-18 Qピルにおける垂直方向の振動加速度レベル分布

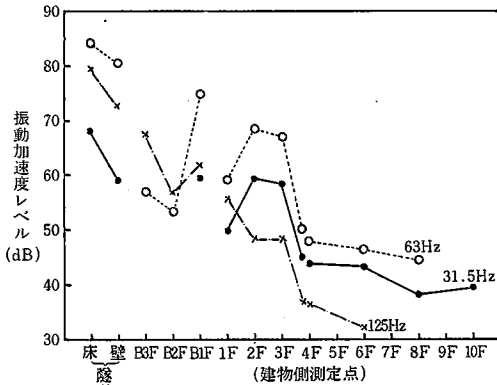


図-19 Tピルにおける垂直方向の振動加速度レベル分布

3-3. 建築構造体における地下鉄振動の伝搬

建築構造体中における地下鉄振動の伝搬特性を調べるために、各建物の床スラブの振動を1オクターブバンドごとの垂直方向の振動加速度レベル分布として整理した。これらの結果のうちから、Iビル、Hビル、Cビル、Qビル、Tビルでの結果を図-15～図-19に示す。

これらの結果から、上階になるほど振動レベルが減少するが、1階当りのレベル減少量は上階になるほど小さくなるという傾向がみられる。なおこの傾向は高い周波数ほど顕著である。

しかし、これらの減衰特性は建物によってかなり異なっており、隧道構築からの距離が長いQビルでは地上階での減衰はほとんど認められない。またここに示した建物以外の建物についての結果も合わせると、規模の大きい建物ほど上階方向への距離減衰量が大きいという傾向がみられた。これらのことから建物内における地下鉄振動の伝搬特性を決定する要素としては、建物の規模、構造、隧道構築からの距離などが考えられる。

また低い周波数では、Hビルにみられるように、中間階より最上階附近の方がレベルが大きくなるなど複雑な

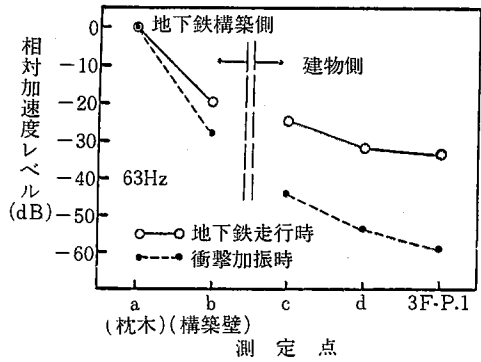


図-20 列車走行とハンマ加振による振動伝搬特性の比較

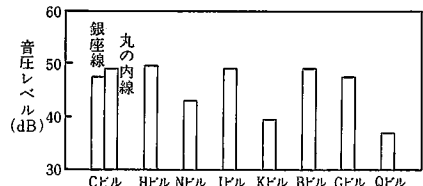


図-21 各建物における列車走行時の騒音レベル

振動レベル分布を示す場合が多い。これは建築構造体中における波動(縦波・屈曲波)の波長は31.5 Hz, 63 Hzなどの低周波数域では、階高、スパン長と同程度あるいはそれ以上となるためと考えられる。

なお振動加速度レベルの分布の上で、地下階あるいは1階では特異なレベルとなっている建物が多いが、これは一般に地下階、1階の構造的条件すなわち床スラブの構造、階高などが特殊であることが多いためと考えられる。

次に、振動源の違いによる伝搬特性の差を比較するため、Iビルにおいて地下鉄振動の隧道構築への入力点である枕木直下のレールをハンマーで衝撃加振し、枕木、隧道構築壁、建物の床スラブ上の各点で振動加速度応答を測定した。地下鉄振動についても同様な測定点で列車走行時の振動を測定した。いずれの測定結果も枕木上での測定値を基準とし、各測定点での相対レベルを求め、伝搬特性の比較を行った。その一例を図-20に示すが、一点加振であるハンマーによる衝撃加振に比べ、地下鉄走行による伝搬は距離による減衰が小さいことがわかる。これは、地下鉄振動は線振動源であることを示している。

3-4. 地下鉄振動による室内騒音

建築構造体に伝搬した地下鉄振動は床、天井、壁などの板面から音として放射される。そこで前述のとおり、すべての建物について騒音の実測調査を行った(ただし、暗騒音の影響を受け、地下階以上の階では測定不可能である建物が多かった)。

各建物の地下階あるいは1階での騒音レベル(dBA)を図-21に示す。図-21を図-9と比較すると、振動レベルに比べ、建物間での騒音レベルの差は小さい。

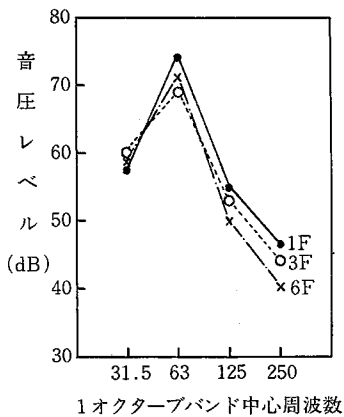


図-22 Iビルにおける列車走行時の室内騒音

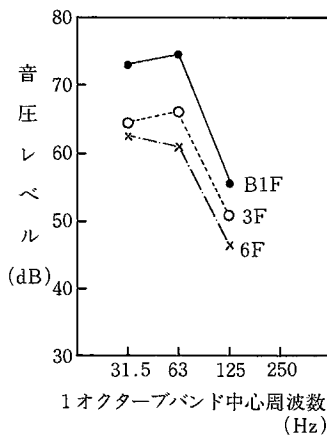


図-23 Hビルにおける列車走行時の室内騒音

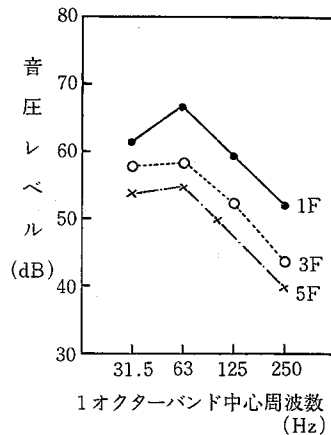


図-24 Cビルにおける列車走行時の室内騒音

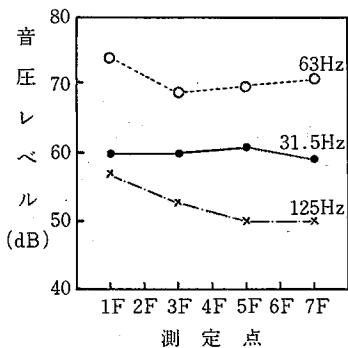


図-25 Iビルにおける垂直方向の音圧レベル分布

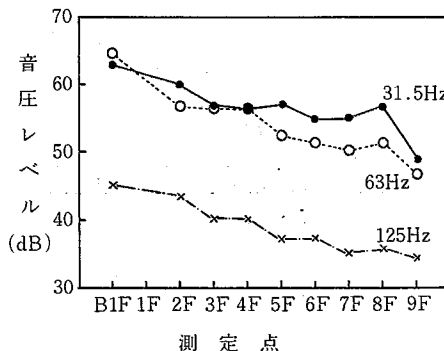


図-26 Hビルにおける垂直方向の音圧レベル分布

上階までの測定が可能であったIビル、Hビル、Cビルについての騒音の周波数特性を図-22～図-24に示す。床スラブの振動加速度レベルと同様に、63 Hzあるいは31.5 Hzの成分が卓越している。

またこれらの三つの建物における騒音を1オクターブバンドごとの垂直方向の音圧レベル分布として整理した。その結果を図-25～図-27に示す。振動のレベル分布と同様に、上階になるほど音圧レベルは減少するが、1階当りのレベル減少量は上階になるほど小さくなるという傾向がみられる。ただし振動のレベル分布よりなめらかな傾向となっているが、これは振動は測定位置によるレベル差が大きいのに比べ、音圧レベルは同一室内ではレベル差が小さいことと、上下階の床スラブから音が放射され平均化されるためと考えられる。

3-5. 地下鉄振動の対策例

今回測定対象とした建物のように、用途が一般的なオフィスビルである場合には、振動・騒音の問題が顕在化することは少ない。しかし居室あるいはオーディトリウムなど静寂を必要とする部分が含まれている場合には大きな問題となる。このような場合には建物側で、振動・騒音の対策が必要となる。

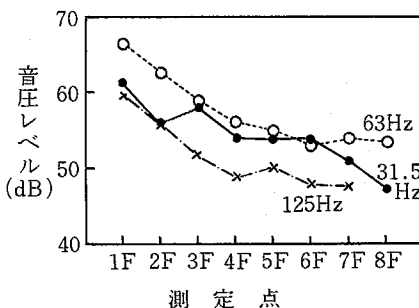


図-27 Cビルにおける垂直方向の音圧レベル分布

その一例として、ここではIビルにおいて行われた対策例を示す。⁴⁾Iビルでは地下鉄走行時の振動による発生音が大きな1階部分に講議室が設けられたため、使用上の問題が生じた。そこで隧道構築側の部屋に対して図-28に示すような浮構造による防振工事が行われた。図-10に示したように、地下鉄走行時の床スラブの振動が63 Hzの成分が卓越していることから、浮構造の共振周波数が20 Hz以下となるように設計された。防振工事前後の発生騒音の比較を図-29に示すが、騒音レベルで約13 dBの低減効果が得られている。

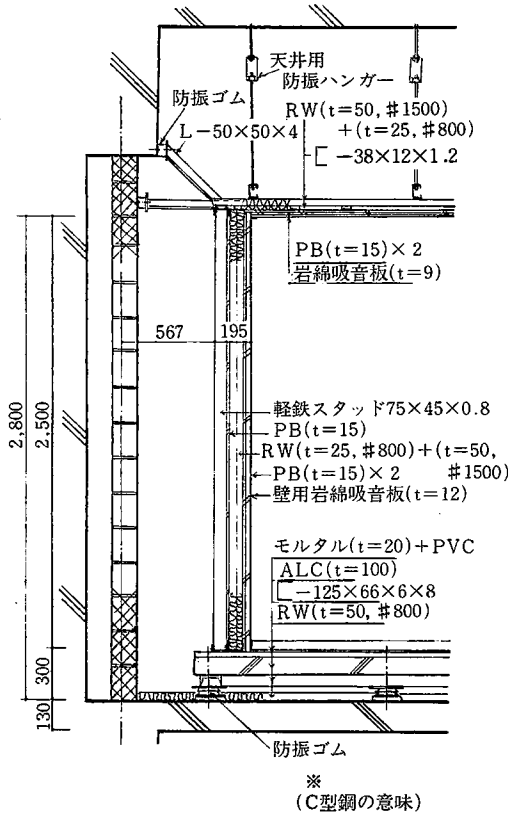


図-28 浮構造による防振対策例

む す び

地下鉄から近接した建物への振動の伝搬について、筆者らの研究室で行った実測による調査結果の概要を述べた。

この種の振動・騒音の問題はわが国だけでなく、高密度化した都市では世界的に共通した問題である。これに対する対策としては、最初にも述べたように振動の発生および伝搬の過程を明らかにし、有効な防除方法を開発する必要がある。

最後に、この研究を進めるにあたり、多大のご協力をいただいた帝都高速交通営団の関係者各位に深く感謝いたします。(1982年9月14日受理)

付録1. 地下鉄振動の測定・分析方法

現場における測定の方法としては各測定に加速度型振動ピックアップを設置し、インピーダンス変換器、前置増幅器を通して、多チャンネルデータレコーダに同時収録した。

分析方法としては、図-付1に示すように、列車が近づいてきて振動が最大近くの一定レベルとなった時点から通過してしまふ間の振動加速度の長時間実効値レベル

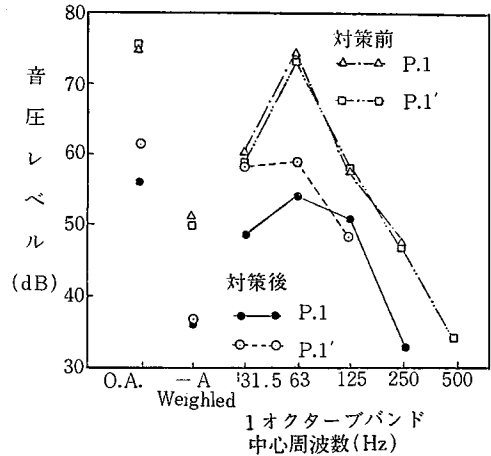


図-29 防振対策前後の地下鉄振動による騒音レベルの比較

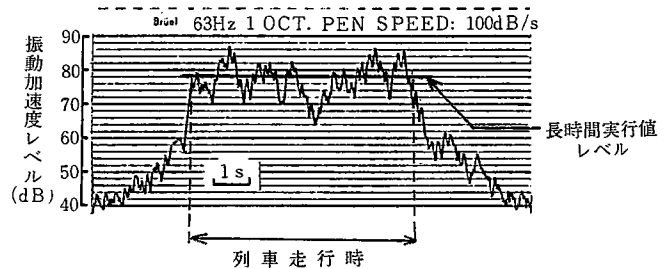


図-付1 列車走行時の振動加速度レベル記録

(基準 $10^{-5}m/s^2$) を、オーバーオールおよび1オクターブバンドごとに求めた。具体的な方法としては、データレコーダで再生した振動加速度信号をオクターブバンドフィルターを通した後、2乗積分する方法、あるいはリアルタイム周波数分析器により時間間隔 50 ms ごとのサンプル値 (総数 200~300 個) をデスクトップコンピュータによってエネルギー平均する方法のいずれかによった。

参 考 文 献

- 1) 松田, 岩瀬, 橘, 石井 "地下鉄振動の近接建物への伝搬" 日本音響学会, 建築音響研究委員会資料, (1979.3)
- 2) 橘, 岩瀬, 松田, 石井, "地下鉄から近接建物への振動の伝搬—実測例とエネルギー的伝搬モデルによる解析—" 電子通信学会技術研究報告 EA 80-58 (1980.12)
- 3) 石井, "地下鉄から建物への固体音の伝搬", 日本音響学会誌, Vol. 38, No. 5 (1982.5)
- 4) 岩瀬, 橘, "地下鉄振動の建物への影響", 音響技術, Vol. 8, No. 2 (1979)
- 5) 風巻, "地下鉄による振動・騒音の防止" 騒音制御 Vol. 1, No. 4 (1977.8)
- 6) 風巻 "地下鉄における防振工法" 音響技術 Vol. 10, No. 2 (1981)