

S8-3-1

地下鉄振動による建物内の固体音の一予測例

[土] ○津野 究 (鉄道総研)
藤井光治郎 (鉄道総研)

[土] 古田 勝 (東京都交通局)
[土] 日下部 治 (東京工業大学)

Prediction of borne noise in buildings caused by subway-induced vibration

Kiwamu Tsuno, (Railway Technical Research Institute)

Masaru Furuta, (Transportation Bureau of Tokyo Metropolitan Government)

Kojiro Fujii, (Railway Technical Research Institute)

Osamu Kusakabe (Tokyo Institute of Technology)

Attenuation properties of subway-induced ground vibration were experimentally investigated to improve the empirical prediction methods for bone noise level in buildings. Dependency of attenuation properties on frequency was examined based on measurement data at 14 locations in and around the Tokyo area, and material damping coefficients in every 1/3 octave band were calculated based on the Bornitz formula. The prediction method of vibration acceleration level in 1/3 octave was proposed based on the relationship between frequency and material damping coefficient. This paper presents the outline of an improved prediction method of vibration and the calculation example of borne noise in basement close to a subway shield tunnel.

キーワード：固体音，地盤振動，地下鉄，シールドトンネル，周波数特性

Keyword: solid-borne noise, ground vibration, subway, shield tunnel, Frequency characteristics

1. はじめに

地下鉄トンネルに近接した建物内において，列車走行時振動に起因する低レベルの固体音が生じる場合がある．固体音の調査・研究に関しては，トンネルと建物とが近接した場合に地盤を介して振動が建物に伝播する事例^{1) 2) 3)}が数例報告されているが，トンネル内と建物の振動を同時に測定し，検討した例⁴⁾は極めて少ない．

そこで，本報告では東京近郊の測定データ^{5) 7)}をもとに，既往の簡易式⁶⁾を用いた地盤中の減衰性状の分析結果から，地盤振動の 1/3 オクターブバンドごとの振動加速度レベルの予測を試みた．さらに，これを用いて，地下鉄に近接する建物の地下室における固体音を予測する手法を示し，試算したので報告する．

2. 地盤中の減衰性状の分析⁷⁾

(1) 測定概要

東京近郊の 14 地点で地下鉄シールドトンネル内および地表部の振動加速度を測定し，1/3 オクターブバンド分析器を用いてバンドごとの振動加速度レベルを求めた．測定箇所の土被りは 11.5m～28.3m，トンネル外径は 5.3, 7.3m (単線) および 10.4m (複線) である．測定機器は，圧電型加速度ピックアップおよび振動計を用いて測定し，振動加速度をデータレコーダーに記録している．

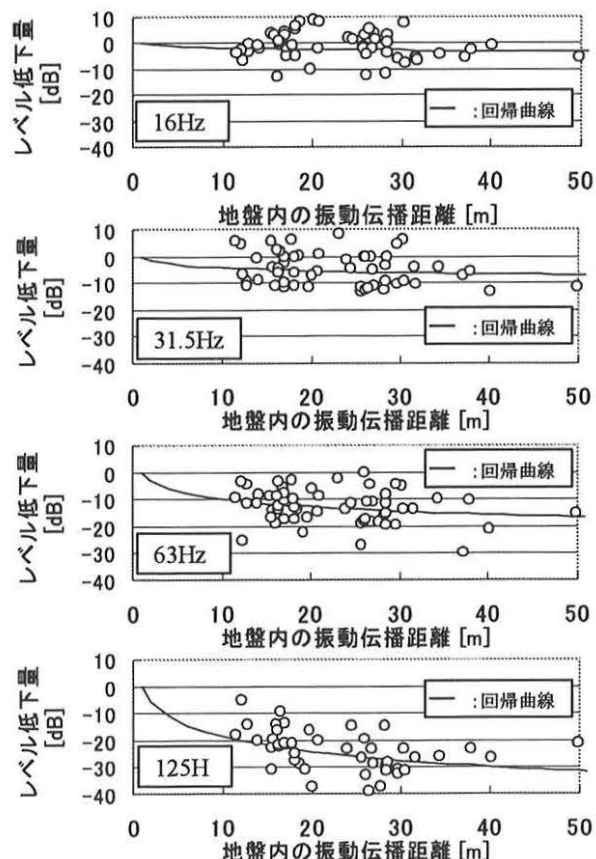


図1 振動伝播距離とレベル低下量の関係

(2) 周波数ごとの減衰性状

地盤内における減衰性状を把握するため、トンネルアーチ部半径方向の 1/3 オクターブバンド分析ごとの振動加速度レベルを基準値とし、これに対する地表部各測点鉛直方向の振動加速度レベルの低下量（以下「レベル低下量」と記す）を計算した。図 1 に例として、中心周波数が 16, 31.5, 63 および 125Hz のバンドについて、振動伝播距離 R （図 2）とレベル低下量の関係をプロットし、回帰曲線を示す。図 1 では、波長の長い 16 および 31.5Hz にはレベル低下量が正の値を含み、レベルの低下が緩慢である。一方、63 および 125Hz ではレベルの低下傾向が顕著である。

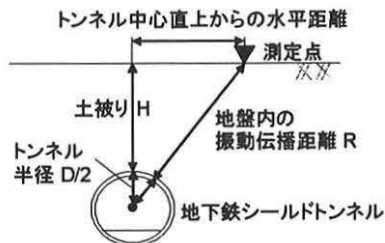


図2 土被りと地盤内の振動伝播距離の関係

(3) 内部減衰定数の検討

10～200Hz の各バンドについて、振動伝播距離とレベル低下量の関係を、振動加速度レベルで表示した Bornitz の計算式（式(1)）⁹⁾を用いて分析し、内部減衰定数 α を計算した結果を図 3 に示す。

$$L_{VA}(f) - L_{VA0}(f) = -20n \log(R/R_0) - 8.68\alpha(f)(R - R_0) \quad \cdots (1)$$

ただし、

$L_{VA}(f) - L_{VA0}(f)$ ：中心周波数 f [Hz] のレベル低下量 [dB]

n ：幾何減衰定数、 $\alpha(f)$ ：内部減衰定数、

R ：振動伝播距離 [m]（トンネル外周と地表部測点の最短距離）

R_0 ：振動源から基準点の距離 [m]

ここでは、各地点においてトンネルアーチ部に対して地表部測定点が複数あることから、測定した各地点それぞれについて対数回帰式による回帰分析を行い、1/3 オクターブバンドごとの内部減衰定数 α を計算している。 R_0 については、1m として計算している。

また、一列車の長さ（132～200m）に比較して、振動が問題とされる距離は水平距離で 30m 程度であることから、地下鉄トンネルを無限長の線状の振動源と見なして、幾何減衰定数 n を 0.5 とし、14 地点の α の平均を求め、回帰分析することによって得られた周波数と α の関係を次式に示す。

$$\alpha = 0.001f - 0.06 \quad \cdots (2)$$

これより、式(1)および(2)を用いて地盤中を伝播する振動の

1/3 オクターブバンドごとの振動加速度レベルの低下量の計算が可能となる。

図 3 の 14 地点の α に、平均およびこれに標準偏差 σ の 1.5 倍に相当する ± 0.053 を加え、図 4 に示す。図から全体の 95% のプロットがこの ± 0.053 の範囲に収まっていることがわかる。これは、東京都内および近郊で想定される地点ごとの条件の違いによる α の変動量に相当すると考えられる。

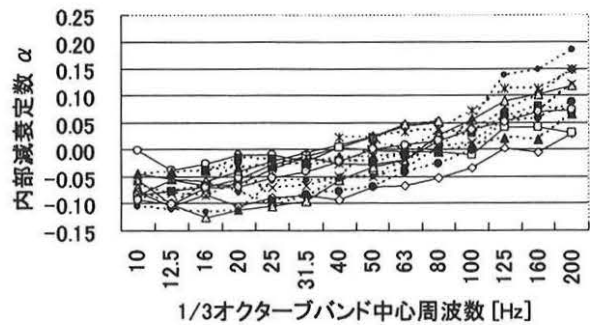


図3 各地点の内部減衰定数 ($n = 0.5$)

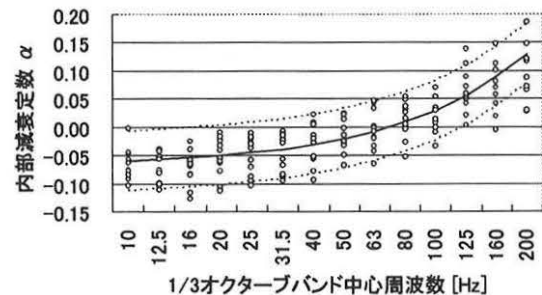


図4 内部減衰定数の変動量

3. 固体音の予測

(1) 検討概要

図 5 に示す、外径 7.3m の単線シールドトンネルに近接する RC 造の建物の地下室内の固体音を試算する。計算に用いる振動源は、①コンクリート直結軌道、②防振まくらぎ軌道 I（防振ゴム、ばね定数 10MN/m）、③防振まくらぎ軌道 II（防振ゴム、ばね定数 4MN/m）、④バラスト軌道の 4 種類の条件において、軌道脇で測定したデータを用いた。なお、ここでは、既往の予測例⁹⁾をもとに式(3)で 60km/h に補正し、入力データとして用いている。

$$L_{VA2} = L_{VA1} + 25 \log_{10} \frac{V}{V_0} \quad \cdots (3)$$

ただし、

L_{VA2} ：速度 V における振動加速度レベル

L_{VA1} ：速度 V_0 における振動加速度レベル

V ：補正速度（=60km/h）、 V_0 ：測定時の速度

入力に用いた振動源の 1/3 オクターブバンドごとの振動加速度レベルを図 6 に示す。

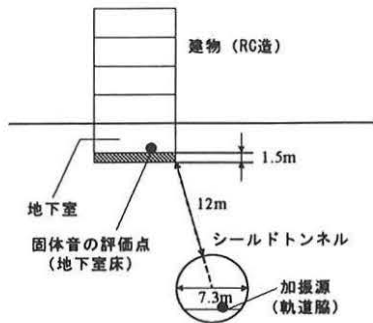
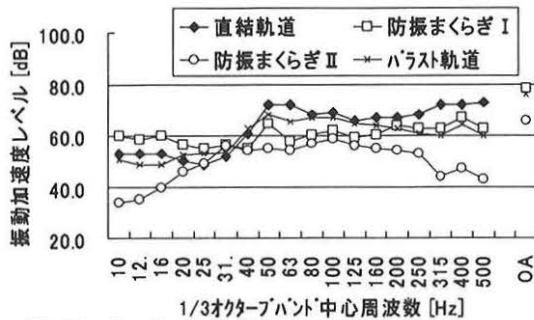


図5 検討条件の概要



注) OA: オーバーオール値

図6 振動源に用いたデータ(軌道脇, 60km/hに補正)

(2) 予測方法

本研究では、図7に示したフローにしたがい、固体音の予測を行った。ここでは、図6に示す振動源の1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルから、①トンネル内における振動の減衰、②地盤中における振動の距離減衰、③地盤から建物への入力損失、④建物内における振動の距離減衰を考慮して地下室床の1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルを計算し、これをもとに音圧レベルおよび騒音レベル(A特性)を求めた。軌道条件の異なる4つの入力条件について固体音を予測し、結果を比較している。

(a) トンネル内における振動の減衰

トンネル内における振動の減衰については、東京都近郊での測定事例^{5),7)}により得られた軌道脇鉛直方向とアーチ部半径方向の振動加速度レベルの差(表1)を用いた。

(b) 地盤中における振動の距離減衰

地盤中における振動の距離減衰は、2章の測定データの分析より得られた式(2)を用いて内部減衰定数 α を計算し、これをBornitzの計算式(式(1))に代入して、1/3オクターブバンドごとに振動加速度レベルの低下量を計算した。なお、内部減衰定数 α については、 ± 0.053 の範囲に分布する傾向がみられたが、ここでは平均値を用いて計算することとした。

(c) 地盤から建物への入力損失

地下鉄トンネルから地盤を介して建物の伝播する場合の入力損失に関する調査例^{2),3)}があるが、東京都近郊の地下鉄単線シールドトンネル近接した建物(杭基礎)と建物周辺地盤の振動レベルを測定したところ、表2のように差は0~3dB程度で大きな差がみられなかった。そこで、地盤から建物への入力損失は、建物位置の振動加速度と周辺地盤の

振動加速度が同一であると仮定して検討した。ここでは、トンネルから建物の基礎梁までの最短距離を伝播距離とみなして計算している。

(d) 建物内における振動の距離減衰

建物基礎梁から固体音の予測点までの距離減衰については、松田ら⁹⁾により提案された建物構造体が一点加振された場合の振動分布の実験式を用いている。

$$L_{VA} = P - 20 \log_{10} r - \alpha \sqrt{f} r \quad \dots (4)$$

ただし、

L_{VA} : 加振点から距離 r の地点の振動加速度レベル[dB]

P : 加振点の強さを表す量 [dB]

r : 建物中を振動が伝播する最短の経路の長さ [m]

α : 内部損失における振動の減衰を表す定数

f : 周波数 [Hz]

係数 α は、東京都内の開削トンネル直上にある建物の測定結果をもとに、中心周波数10~63Hzの周波数帯で0.02、80~100Hzで0.03、125Hz以上で0.04と仮定した。

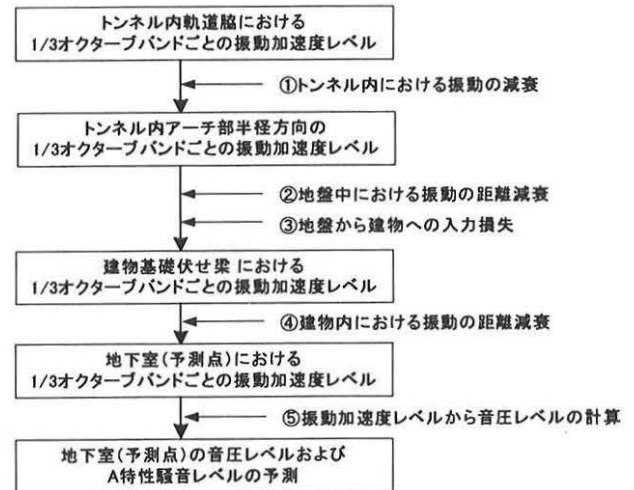


図7 固体音予測のフロー

表1 計算に用いたトンネル内における振動の減衰

周波数 [Hz]	10	12.5	16	20	25	31.5
レベル差 [dB]	1.3	2.4	1.8	2.7	4.0	4.5
周波数 [Hz]	40	50	63	80	100	125
レベル差 [dB]	2.3	2.5	2.4	4.2	3.3	4.0
周波数 [Hz]	160	200	250	315	400	500
レベル差 [dB]	2.6	6.1	11.4	20.0	20.3	20.4

表2 建物と周辺地盤における振動レベル[dB]の例

	A地点 上り	A地点 下り	B地点 上り	B地点 下り
建物内の振動レベル	48	48	46	43
周辺地盤の振動レベル	51	51	47	43

(e) 音圧レベルおよび騒音レベルの計算

次式に示す拡散音場の音圧レベルの計算式を用いて、1/3オクターブバンドごとの音圧レベルを計算した。

$$SPL = L_{VA} - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} (k/(A/S)) + 36 \quad \cdots (5)$$

ただし、

SPL_{VA} : 音圧レベル[dB], L_{VA} : 振動加速度レベル

k : 放射係数, A : 室内の吸音力

S : 振動体面積, f : 周波数 [Hz]

放射係数 k 等は、床、天井、壁、ドア、窓、内装等のそれぞれの部位について設定することが望ましいが、ここでは音楽ホールの予測例¹⁾を参考に $k=1$ とし、室内空間全ての面が一様な振幅で振動するものとして $A/S=0.25$ と設定した。

(3) 予測結果

トンネルアーチ部、建物基礎梁および建物予測点の1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルの計算結果について、図8にコンクリート直結軌道および防振まくらぎ軌道の場合を示している。さらに、建物予測点における1/3オクターブバンドの振動加速度から計算した1/3オクターブバンドごとの音圧レベルを図9に、固体音の騒音レベルを表3に示す。図9では、ばね定数の小さい防振まくらぎ軌道Ⅱを除き、50Hzに音圧レベルのピークがある結果となっている。また、固体音の騒音レベルは、直結軌道、バラスト軌道、防振まくらぎ軌道Ⅰ、防振まくらぎ軌道Ⅱの順になっている。

4. まとめ

本報では、1/3オクターブバンドごとの地盤中を伝播する振動の振動加速度レベルを予測する方法を提案し、これを用いた固体音の試算例を示した。これにより、振動源の振動加速度スペクトルを仮定すれば、簡便に固体音が予測できるようになった。ただし、本報では、地盤から建物への入力損失を0と仮定しているが、杭基礎の構造などの計測データの蓄積並びに建物内の吸音率等の詳細な計算方法など、更なる検討の必要があると考えている。

参考文献

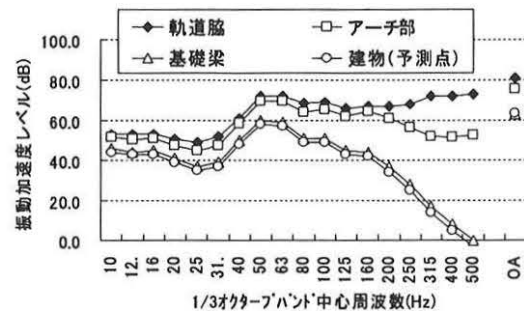
- 1) 池田寛：建築物における地下鉄騒音の予測と対策，騒音制御，Vol.21, No.6, pp.397-400, 1997.
- 2) 吉原醇一，中村充，安井譲，平野滋：地下鉄振動の伝搬性状に関する研究(2)，大林組技術研究所報 No.43, pp.21-28, 1991.
- 3) 藤井光治郎，武居泰，伊積康彦，増子友介，柴田昭彦：鉄道に近接する大規模建物の振動伝搬特性，鉄道総研報告，Vol.16, No.12, pp.41-46, 2002.
- 4) 清水和男：地下鉄走行による家屋内固体音，騒音制御，Vol.3, No.5, 1979.
- 5) 藤井光治郎，武居泰，津野究：トンネルからの地盤振動伝搬特性，鉄道総研報告，Vol.18, No.11, 2004.
- 6) G.Bornitz: Über die Ausbreitung der von Grozklolben-

maschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, J. Springer, 1931

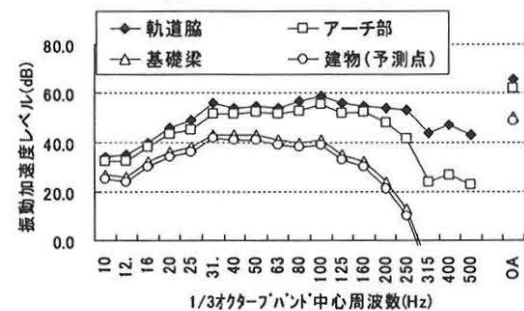
7) 津野究，古田勝，藤井光治郎，長嶋文雄，日下部治：地下鉄シールドトンネルから伝播する広帯域振動の減衰特性，土木学会論文集，No.792/III-71, pp.185-197, 2005.

8) 東京都：都市高速鉄道第12号線新宿・練馬間建設事業環境影響評価書，資料編，pp.148-172, 1989.

9) 松田由利，橋秀樹，石井聖光：建物構造体における固体音の伝搬性状，日本音響学会誌，Vol.35, No.11, pp.609-615, 1979.



(a) コンクリート直結軌道



(b) 防振まくらぎ軌道Ⅱ

注) OA: オーバーオール値

図8 トンネル、基礎梁、建物における振動加速度レベル

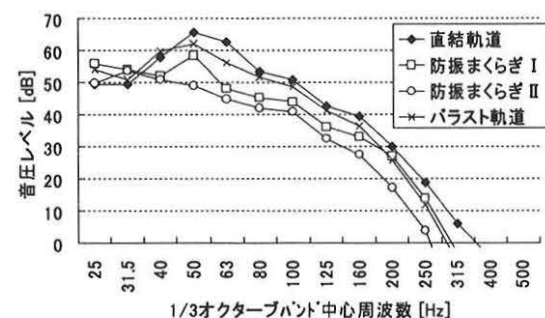


図9 固体音の音圧レベルの計算結果

表3 固体音の騒音レベルの計算結果

軌道構造	騒音レベル [dB]
コンクリート直結軌道	40.5
防振まくらぎ軌道Ⅰ	32.2
防振まくらぎ軌道Ⅱ	27.2
バラスト軌道	37.2