

地下鉄防振対策による近接建物内の振動・騒音評価手法

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 山田 壮太
新潟大学工学部社会基盤プログラム 正会員 阿部 和久
日本工営（株） 正会員 古田 勝
新潟大学工学部社会基盤プログラム 正会員 紅露 一寛

1 はじめに

地下鉄列車走行時における振動が周辺の建物などに及ぼす影響の評価は、防振対策上重要である。特に、軌道が大きく影響を及ぼすため、当該構造を工夫することが振動低減に有効と考えられる。既往の研究¹⁾では、国内で導入されている「防振まくらぎ軌道」と、海外で採用実績のある「防振マット軌道」とを対象に、トンネル内の振動低減に有効な軌道構造を検討した。本研究では、文献1)に構成した軌道・トンネル・地盤連成解析法に基づき、近接建物における振動・騒音を対象とする一連の効率的評価手法を構築し、軌道構造や防振材の剛性などが有する効果について検討する。

2 対象とする防振軌道の概要

防振マット軌道の概略を、図-1に示す。図-1のように、軌道スラブとトンネルインバートの間に低剛性のポリウレタン素材の防振マットが挿入された構造となっている。この構造は、建設工事の施工性が良く、建設費用が安く、防振マット・スラブ系の固有振動数を車両・軌道系の振動数より低く設定することにより、大きな振動低減を得ることができる。

一方、防振まくらぎ軌道とは、図-2のように、まくらぎを防振パッドで支持したものである。この構造は、道床コンクリートへの負担が小さいため、耐用年数が比較的長く、既設軌道へも適用可能である。

3 解析対象

本研究では、軌道系とトンネル・地盤系とに分離して解析を構成する。軌道系は、無限長レールとそれを間隔 L で離散支持しているまくらぎによりモデル化する。防振まくらぎ軌道の例を図-2に示す。単線軌道を想定し、連成系全体の対称性により、レール1本分を考える。レールは曲げ剛 EI 、単位長さ当たり質量 ρA の Euler ばりで表す。まくらぎは質量 m_s (レール1本当たり) の質点で表す。また、レール・まくらぎ間の軌道パッド k_r の他に、防振パッド k_s をまくらぎ下に設置する。

トンネル・地盤系を図-3に示す。トンネル部はコンクリート道床・インバート・覆工から構成されており、円形

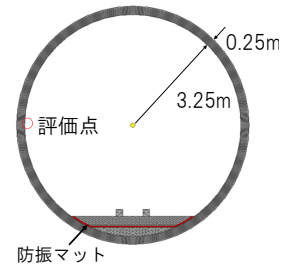


図-1 トンネル断面 (防振マット軌道)

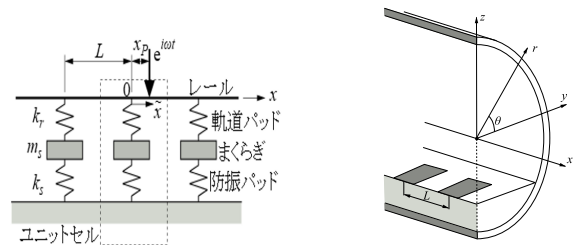


図-2 軌道のモデル化

図-3 トンネル・地盤のモデル化

の外周を有し長手方向に一樣な無限長弾性体として表現する。一方、地盤は一樣無限動弾性場でモデル化する。トンネル・地盤境界は完全に接合されており、滑りや剥離は一切生じないものとする。また、解の記述にあたり、軌道長手方向に x 座標を設定し、図-3に示す様に円形トンネル断面に関して直交座標系 (y, z) と極座標 (r, θ) を併用する。

4 軌道・トンネル・地盤連成応答解析手法の概要¹⁾

4.1 軌道のモデル化

図-2の軌道系調和加振問題は次式で与えられる。

$$EIw'''' - \rho A \omega^2 \tilde{w} = \delta(x - x_p) - \sum_{j=-\infty}^{\infty} F_j \delta(x - Lj) \quad (1)$$

ここで、 w はレールたわみ、 x_p は単位調和加振 $e^{i\omega t}$ の作用位置、 F_j は j 番まくらぎからレールに作用する荷重振幅、 δ はデルタ関数、 $w'''' = d^4w/dx^4$ である。たわみ応答に対して、まくらぎ間隔 L に関する次の Floquet 変換を適用する。

$$\tilde{w}(\tilde{x}, \kappa) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} w(\tilde{x} + nL) e^{in\kappa L} \quad (2)$$

ここで、 \tilde{x} は軌道1ユニット $(-L/2, L/2)$ 内の座標、 κ は Floquet 波数と呼ばれる波数の次元を持つ変数である。なお、Floquet 変換は \tilde{x} と κ について次の周期性を持つ。

$$\begin{aligned}\tilde{w}(\tilde{x} + L, \kappa) &= e^{-i\kappa L} \tilde{w}(\tilde{x}, \kappa), \\ \tilde{w}(\tilde{x}, \kappa + \frac{2\pi}{L}) &= \tilde{w}(\tilde{x}, \kappa)\end{aligned}\quad (3)$$

一旦 Floquet 変換の解が得られると、式 (1) の解は次式の逆 Floquet 変換により求めることができる。

$$f(\tilde{x} + nL) = \frac{L}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{L}}^{\frac{\pi}{L}} \tilde{f}(\tilde{x}, \kappa) e^{-in\kappa L} d\kappa \quad (4)$$

\tilde{w} は、式 (3) の周期条件の下、1 ユニット内で次の方程式をみたす。

$$EI\tilde{w}'''' - \rho A\omega^2 \tilde{w} = \delta(\tilde{x} - x_p) - k_e \tilde{w} \delta(x) \quad (5)$$

ここで、Floquet 変換の下に定義されたまくらぎ・トンネル・地盤系の動的等価剛性 k_e を用いて、まくらぎ反力を $k_e \tilde{w}$ と表している。

式 (3) 第 1 式の周期条件をみたす様に、 \tilde{w} を以下の Fourier 級数展開により表現する。

$$\tilde{w} = \sum_n w_n(\kappa) e^{-iz_n x}, \quad z_n = \frac{2\pi n}{L} + \kappa \quad (6)$$

式 (4) をみたす様に w_n を決定し、式 (5) より、まくらぎ直上のレールたわみ $\tilde{w}(0) = \sum \tilde{w}_n$ を求める。

4.2 トンネルのモデル化

図-3 に示したトンネル・地盤連成系を、軌道同様にまくらぎ間隔 L に関して x 方向に Floquet 変換する。トンネル 1 ユニットにおける Floquet 変換 \tilde{u} の構成に当り、トンネル長手方向 \tilde{x} については軌道と同様に Fourier 級数展開する。これにより、当該問題はトンネル断面に関する準二次元問題に帰着する。トンネル断面は複雑な形状を有するため、有限要素法により離散近似する。トンネルの応答解 \tilde{u} は次式によって表される。

$$\tilde{\mathbf{u}} = [\mathbf{N}(y, z)] \sum_n \{\mathbf{U}_n\} e^{-iz_n x} \quad (7)$$

ここで、 $[\mathbf{N}]$ は断面内の有限要素補間関数から成る行列、 $\{\mathbf{U}_n\}$ は Fourier 級数第 n 項における節点変位ベクトルである。また、ひずみと応力の Floquet 変換の Fourier 係数項は、それぞれ次式の様に与えられる。

$$\{\tilde{\epsilon}_n\} = [\mathbf{B}_n] \{\mathbf{U}_n\}, \quad \{\tilde{\sigma}_n\} = [\mathbf{D}] \{\tilde{\epsilon}_n\} \quad (8)$$

ここで、 $[\mathbf{B}_n]$ 、 $[\mathbf{D}]$ は、それぞれひずみ・変位関係および応力・ひずみ関係を与える行列である。トンネルの有限要素方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}[\mathbf{K}'_n] \{\mathbf{U}_n\} &= \{\mathbf{F}_n\}, \\ [\mathbf{K}'_n] &= [\mathbf{K}_n - \omega^2 \mathbf{M}]\end{aligned}\quad (9)$$

ここで、 $[\mathbf{K}_n]$ 、 $[\mathbf{M}]$ は剛性行列と質量行列である。

式 (9) の有限要素方程式を、トンネル・地盤境界節点とそれ以外とに分けて表すと次式となる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}'_{naa} & \mathbf{K}'_{nab} \\ \mathbf{K}'_{nba} & \mathbf{K}'_{nbb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{na} \\ \mathbf{U}_{nb} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{na} \\ \mathbf{F}_{nb} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

ここで、 $(\)_b$ はトンネル・地盤境界節点に関する成分、 $(\)_a$ はそれ以外の節点成分である。

地盤境界における地盤インピーダンス行列を $[\hat{\mathbf{K}}_n]$ とおき、次式をみたすものとして定義する。

$$[\hat{\mathbf{K}}_n] \{\mathbf{U}_{Gn}\} = \{\mathbf{F}_{Gn}\} \quad (11)$$

ここで、 $\{\mathbf{U}_{Gn}\}$ 、 $\{\mathbf{F}_{Gn}\}$ は、それぞれ地盤側の節点変位と節点力である。

トンネル・地盤境界において、次の変位の適合条件と、力のつり合い条件を課す。

$$\{\mathbf{U}_{nb}\} = \{\mathbf{G}_{Gn}\}, \quad \{\mathbf{F}_{nb}\} + \{\mathbf{F}_{Gn}\} = 0 \quad (12)$$

式 (11)、(12) を (10) に代入すると、次の求解方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}'_{naa} & \mathbf{K}'_{nab} \\ \mathbf{K}'_{nba} & \mathbf{K}'_{nbb} + \hat{\mathbf{K}}_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U}_{na} \\ \mathbf{U}_{nb} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_{na} \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (13)$$

以上より、本問題は地盤インピーダンス行列 $[\hat{\mathbf{K}}_n]$ の導出に帰着する。

4.3 地盤のモデル化

地盤変位の Floquet 変換を次式のように表現する。

$$\tilde{\mathbf{u}}_G = \nabla \phi + \nabla \times \{ \psi \mathbf{e}_x + \ell \nabla \times (\chi \mathbf{e}_x) \} \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{e}_x は x 軸方向の単位ベクトル、 ℓ は長さの次元を有するパラメータであり、値は任意である。

式 (14) における ϕ 、 ψ 、 χ を、図-3 の円筒座標系の下、次式により展開する。

$$\begin{aligned}f &= \sum_{n,m} a_{nm}(\kappa) H_m^{(2)}(k_n r) e^{im\theta} e^{iz_n \tilde{x}} \\ k_n^2 &= \frac{\omega^2}{C^2} - z_n^2\end{aligned}\quad (15)$$

ここで、 f は ϕ 、 ψ 、 χ の何れかであり、 a_{nm} は展開係数である。 $H_m^{(2)}$ は m 次の第 2 種ハンケル関数である。また、 C は地盤の縦波または横波の伝播速度 C_L 、 C_T の何れかであり、 $f = \phi$ の場合は $C = C_L$ 、 ϕ 、 χ の場合は $C = C_T$ で与えられる。トンネル・地盤境界 S_R 上で、式 (7) と (14) との適合条件、および接触力のつり合い条件を課すことで、最終的に次のインピーダンス行列を得る。

$$\hat{\mathbf{K}}_{n,jl} = -\frac{L}{2\pi R} [\mathbf{L}_j^T] \sum_m [\mathbf{Q}_{jm}^* \mathbf{S}_{nm} \mathbf{U}_{nm}^{-1} \mathbf{Q}_{lm}] [\mathbf{L}_l], \quad (16)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{K}}_{n,jl}$ は、インピーダンス行列 $[\hat{\mathbf{K}}_n]$ の j および l 番節点に関する部分行列である。

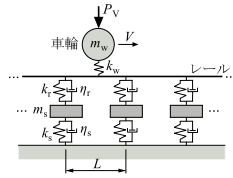


図-4 車輪・軌道系のモデル化(防振まくらぎ軌道)

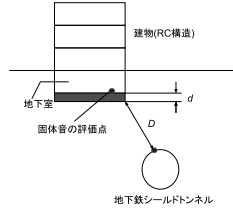


図-5 トンネル・建物の幾何条件

4.4 軌道・トンネル・地盤応答解析

式(13)により、コンクリート道床上面まくらぎ設置箇所($x_p = 0$)の単位加振問題を解く。当該加振位置の鉛直変位応答を \tilde{u}_{B0} とおくと、トンネル・地盤連成系の動的等価剛性は $k_b = 1/\tilde{u}_{B0}$ で与えられる。すると、 k_e が得られ、軌道・トンネル・地盤連成系1ユニットにおける応答を求めることができる。さらに、式(4)の逆Floquet変換より、レール単位調和加振に対する応答解を得る。

5 車輪走行時の輪重評価

建物内の振動・騒音の評価には、加振源となる輪重応答を定量的に設定する必要がある。そのため本研究では、離散支持レールと車輪との間に凹凸を設定して車輪走行解析を行い、その結果より輪重スペクトルを求める。列車走行によるトンネル応答は、レール定点単位加振に対する応答と、輪重スペクトルとの積によって近似評価する。

走行車輪と離散支持軌道との連成解析モデルについて、防振まくらぎ軌道を例に図-4に示す。コンクリート道床は剛基礎とし、有限長軌道でモデル化する。パッド類の減衰 η_r, η_s はダッシュポットで与え、一定速度 V で走行する車輪は質点 m_w により表現し、レール・車輪間接触力は線形ばね k_w で評価する。レールはEulerばり要素により離散化し、連成解を時間積分により求める。

6 建物内の振動・騒音評価手法

トンネルを振動源として、そこから地盤を経由して建物内へ到達する振動および騒音については、既往の経験式に基づき評価する。その際に、(1)トンネルから建物までの地盤内に生ずる減衰²⁾、(2)建物内の伝播過程における減衰³⁾、(3)建物振動による音の放射³⁾、の3つの過程に分けて低減量を求める。

6.1 地盤中の振動減衰評価²⁾

振動がトンネルから地盤を経由して建物に到達するまでの過程における振動加速度レベルの低下量(減衰量) ΔL_{VA1} を、東京都区部の沖積及び洪積層地盤での測定結果に基づいた以下の経験式により評価する。

$$\Delta L_{VA1} = -20q \log_{10} D - 8.68\alpha(f)D \quad (17)$$

$$\alpha(f) = 0.001f - 0.06$$

ここで、 D はトンネルと建物間の最短距離(図-5)、 q はトンネルから放射される波動の幾何減衰であり、列車一編成の長さ(130~200m)に比べ距離 D が数十m程度短いものとする。地下鉄トンネルを無限長の線状振動源と見なすことができるため、 $q = 1/2$ と設定する。 α は内部減衰定数であり、文献5)に示された測定データの回帰式を採用している。また、 f は1/3オクターブバンド中心周波数(Hz)である。

6.2 建物内の振動減衰評価³⁾

地下鉄トンネルに近接するRC構造の建物を対象に考える(図-5)。建物基礎伏せ梁から固体音評価点までの距離減衰 ΔL_{VA2} を、実験式⁵⁾に基づいた次式により評価する。

$$\Delta L_{VA2} = -20q \log_{10} d - \beta\sqrt{f} + 25 \log_{10} \frac{V}{V_{60}} \quad (18)$$

ここで、 d は建物内の振動伝播距離である。また、 β は内部損失に関する減衰を表す定数であり、過去の測定結果に基づき中心周波数10~63Hzの周波数帯で0.02、80~100Hzで0.03、125以上で0.04と設定した。右辺の最後の項は列車速度補正項であり、60km/hを基準とした走行速度 V_{60} に補正している⁴⁾。なお、地盤から建物内への入力損失は比較的小さいことより、無視することとした。

6.3 室内の音圧評価³⁾

1/3オクターブバンドごとの室内音圧レベル SPL を、次の拡散音場の音圧レベル計算式⁶⁾により評価する。

$$SPL = L_{VA} - 20 \log_{10} f + 10 \log_{10} \frac{\kappa_0}{\bar{\alpha}} + 36 \quad (19)$$

ここで、 L_{VA} は建物内振動評価点における振動加速度レベルである。また、 κ_0 は放射係数、 $\bar{\alpha}$ は室内平均吸音率であり、解析では文献6)を参考に $\kappa_0 = 1$ および $\bar{\alpha} = 0.25$ と設定した。なお、 L_{VA} は式(17)、(18)に基づき、次式で与えられる。

$$L_{VA} = L_{VA0} + \Delta L_{VA1} + \Delta L_{VA2} \quad (20)$$

ここで、 L_{VA0} は振動応答解析より求めたトンネルアーチ部の振動加速度レベルである。

7 解析結果

7.1 軌道・トンネル・地盤の解析条件

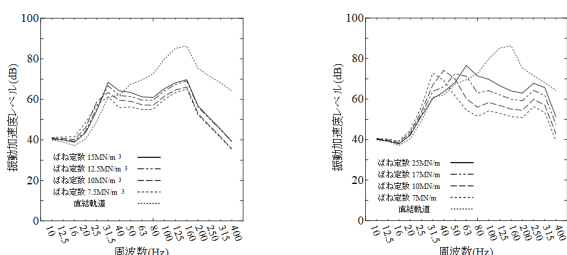
防振まくらぎは図-2のようにモデル化した。一方、防振マット・直結軌道は、まくらぎがコンクリート道床に直結した構造とし、レール支持部は軌道パッドのみで与えた。軌道パッドの動的剛性は $k_r = 83\text{MN/m}$ (直結軌道の場合は 30MN/m) とした。レールは UIC60 を想定し、 $EI = 6.3\text{MN}\cdot\text{m}^2$ 、 $\rho A = 60.4\text{kg/m}$ と設定した。レール 1 本分のまくらぎ質量は $m_s = 100\text{kg}$ 、まくらぎ間隔は $L = 0.6\text{m}$ とした。

防振パッドの動的剛性には、 $k_s = 7, 10, 17, 25\text{MN/m}$ の 4 ケースを設定した。また、防振マット軌道では、トンネルインバートとコンクリート道床間に挿入する低剛性マットの単位面積当たりの動的剛性を $7.5, 10, 12.5, 15\text{MN/m}^3$ の 4 ケース設定した。

トンネル断面は図-1 に示したとおりであり、トンネル半径を 3.25m 、コンクリート覆工厚は 0.25m とした。

7.2 トンネル振動加速度レベル

図 4 のトンネル評価点における振動加速度レベルを直結軌道と合わせて、防振マット軌道と防振まくらぎ軌道についてそれぞれ図 6(a), (b) に示す。防振マット軌道では(図 6(a))、 31.5Hz 付近の卓越応答について、防振マットの低剛性化に伴う振動加速度レベルの低減効果が認められる。一方、防振まくらぎ軌道でも(図 6(b))、防振パッドの低剛性化による卓越周波数の低下が認められる。また、高周波数域での振動低減効果が比較的明瞭に現れている。防振マット・コンクリート道床系の共振周波数は防振まくらぎ軌道のそれより低く、ピーク値も低いため、 100Hz 以下の周波数では前者の低減効果がより顕著に認められる。

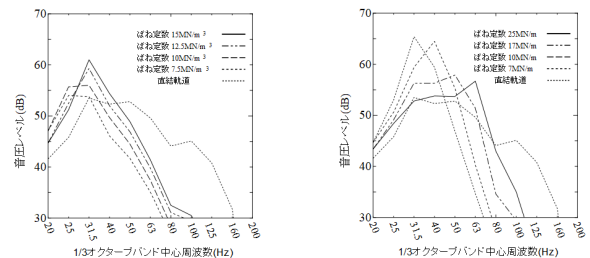


(a) 防振マット軌道 (b) 防振まくらぎ軌道
図-6 トンネル振動加速度レベル

7.3 室内音圧レベル

防振マット軌道と防振まくらぎ軌道に対して求めた固体音の音圧レベルを、それぞれ図 7(a), (b) に示す。トンネルから建物の室内評価点へ振動が伝播する過程における減衰の条件は、何れの軌道構造に対しても同じであるため、

室内における音圧の大小関係はトンネルの振動加速度レベルでの大小関係と一致する。そのため、トンネルにおける振動加速度レベルと同様に、広い周波数域において防振マット軌道の方が防振まくらぎ軌道より低い音圧レベルを与える。



(a) 防振マット軌道 (b) 防振まくらぎ軌道
図-7 室内音圧レベル

8 おわりに

本研究では、地下鉄軌道を対象に、近接建物における振動・騒音の簡易評価手法を構築した。計算負荷軽減のために、一連の計算を、走行車輪・連成解析と、軌道・トンネル・地盤の定点調和加振応答解析、および地盤・建物の振動伝播・減衰評価の 3 つ分割した。なお、軌道・トンネル・地盤連成系の三次元応答解析には、文献 1) に構成した手法を用いることで、計算量の軽減を図った。また、トンネルから地盤を経由して建物内に到達する振動の減衰量を、経験式に基づき簡易に求める方法を採用した。解析を通し、 100Hz 以下の周波数域における防振マット工法の有効性を確認した。なお、トンネルと建物の室内評価点との間における条件は軌道構造によらず同一としており、室内における音圧の大小関係はトンネルにおける振動加速度レベルでの大小関係に一致する。

参考文献

- 1) 阿部和久, 山田高也, 古田勝, 末原美智子, 紅露一寛: 地下鉄トンネル・地盤連成系の三次元加振応答解析, 土木学会論文 A2(応用力学), Vol.74, No.2, I.523-I.534, 2018.
- 2) 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, 185-197, 2005.
- 3) 津野究, 古田勝, 藤井光治郎, 長嶋文雄, 日下部治: 地下鉄振動による建物内の固体音の予測例, J-Rail2005 講演論文集, 501-504, 2005.
- 4) 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.
- 5) 松田由利, 橘秀樹, 石井聖光: 建物構造体中における固体音の伝搬性状, 日本音響学会誌, 35(11), 609-615, 1979.
- 6) 池田覚: 建築物における地下鉄騒音予測と対策, 騒音制御, 21(6), 397-400, 1997.