

地下鉄の軌道構造がトンネル振動特性に及ぼす影響

新潟大学大学院自然科学研究科

新潟大学工学部社会基盤工学プログラム

新潟大学工学部社会基盤工学プログラム

日本工営株式会社

日本工営株式会社

学生員 山田 高也

正会員 阿部 和久

正会員 紅露 一寛

正会員 古田 勝

末原 美智子

1. はじめに

列車走行による振動が周辺環境に与える影響は長年問題となっている。その中でも特に、軌道構造が振動に大きな影響を及ぼすことが分かっており、軌道構造を改良することにより、振動を大幅に低減できると考えられる。我が国においては具体的対策として防振まくらぎや、弾性まくらぎ、フローティング・スラブ等の軌道構造が採用されている。一方、国外では防振マット工法が採用されている。

本研究では、防振まくらぎと防振マット工法における構造諸元が振動低減に及ぼす影響を数値解析を通して調べ、その効果について検証する。

2. 各種防振構造の概要

防振マット工法の概略を、図1に示す。図のように軌道スラブとインバート間に低剛性の防振材が挿入された構造となっている。この防振材・軌道スラブ系の固有振動数を車両・軌道系の共振振動数より低く設定することにより振動低減を得ることができる。

一方、防振まくらとは、まくらぎを弾性材で支持するものである。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. 解析手法

(1) 軌道系

本研究では、軌道のまくらぎ間隔による周期性に基づき、トンネル(軌道)長手方向にFloquet変換¹⁾を施す。この時解 f は、次の周期条件をみたす。

$$\tilde{f}(x+L, \kappa) = e^{-i\kappa L} \tilde{f}(x, \kappa) \quad (1)$$

ここで、 κ はFloquet波数、 L はまくらぎ間隔である。

軌道加振問題のFloquet変換は次式で与えられる。

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

ここで、 w はレールたわみ、 EI 、 ρA はレール曲げ剛性と単位長さ当たり質量、 x_p は加振位置、 k_e はまくらぎ以下の動的等価剛性、 $()'$ は軌道長手方向座標 x に関する微分、 δ はデルタ関数である。

式(1)をみたす様に、 $\tilde{w}$ を x に関してFourier級数展開する。

$$\tilde{w} = \sum_n w_n e^{-iz_n x}, \quad z_n = \frac{2\pi}{L}n + \kappa \quad (3)$$

式(2)をみたす様に w_n を決定し、式(3)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。

(2) トンネル・地盤系

トンネル部は断面内に有限要素分割し、変位解を次式で与える。

$$\tilde{u} = [N(y, z)] \sum_n U_n e^{-iz_n x} \quad (4)$$

ここで、 $[N]$ は断面内の有限要素補間関数から成る行列、 U_n は節点変位ベクトルである。式(4)より剛性行列と質量行列を導出する。

3次元無限一様地盤の変位 $\tilde{u}_G$ は波動ポテンシャル ϕ, ψ, χ により次式の様に表現する。

$$\tilde{u}_G = \nabla\phi + \nabla \times \{ \psi e_x + l \nabla \times (\chi e_x) \} \quad (5)$$

ここで、ポテンシャル関数 $f(\phi, \psi, \chi)$ は次の波動方程式をみたすものとする。

$$C^2 \nabla^2 f + \omega^2 f = 0 \quad (6)$$

なお、 $f = \phi$ の場合の C は縦波伝播速度 C_L であり、 $f = \psi, \chi$ では横波伝播速度 C_T で与えられる。式(6)をみたす様に、これらの解を次式により展開表現する。

$$f = \sum_{n,m} a_{nm}(\kappa) H_m^2(k_n r) e^{im\theta} e^{-iz_n x} \quad (7)$$

ここで、図2の様に極座標 (r, θ) を導入している。また、 a_{nm} は展開係数、 H_m^2 は m 次の第2種ハンケル関数、 $k_n = \omega^2/C^2 - z_n^2$ である。

式(5)よりトンネル外周部地盤表面力を記述し、トンネル有限要素変位に対応する節点変位と地盤節点力との関係を与える地盤インピーダンス行列を導出する。これをトンネルの有限要素方程式に組み込むことで、トンネル・地盤系の求解方程式を得る。



図1 トンネル断面図

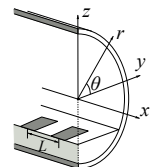


図2 トンネル構造

Key Words: track structure, vibration reduction, Floquet transform

連絡先: 〒 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL: 025(262)7028, FAX: 025(262)6775

4. 解析条件

軌道構造として、防振まくらぎ軌道、防振マット軌道、コンクリート直結軌道の3ケースを対象とし、各軌道条件を以下のように設定して解析を行う。

- 1) 防振マット軌道 RC道床を防振マットが連続支持する構造であり、図1の防振マット部分に 0.4MN/m^3 の剛性を設定する。軌道構造は直結軌道とする。
- 2) 防振まくらぎ まくらぎ下パッドに低バネ定数(動的) 9.95MN/m のパッドを挿入する。これにより軌道振動の道床・トンネルへの伝播を抑制する。
- 3) 直結軌道 防振まくらぎの下パッドを省略して、振動対策が施されていない軌道である。コンクリート断面は、防振まくらぎと同様なものとする。

5. 解析結果

(1) トンネル振動特性

防振マット軌道について、トンネル・地盤連成系の求解行列の絶対最小固有値を波数(横軸)-周波数(縦軸)平面に描画したものを図3に示す。図より防振マットの導入により、25Hz付近から波動が発生しており(カットオン周波数)、コンクリートスラブが弾性床上はりとして振動するモードの存在が確認できる。

(2) 軌道分散曲線

軌道の振動特性を調べるための分散曲線を、防振まくらぎ軌道と直結軌道についてそれぞれ図4に示す。直結軌道では、共振周波数が140Hz付近に存在している。一方、防振まくらぎ軌道の場合、40Hz、150Hz、270Hz付近に共振周波数が存在している。前者の2つはまくらぎ振動に関するモードであり、後の1つはレール振動に関するモードである。本研究では車輪を定点加振する問題を考えるため、車輪を付加した系の連成応答では、車輪の質量の影響により、これらの共振周波数が低下するものと考えられる。

(3) 相対振動加速度レベル

軌道系の応答解析を行い、その結果に基づき、車輪・軌道・トンネル・地盤連成系の応答を求めた。前述の3つの軌道構造を対象に、トンネル側面の鉛直変位に関する相対振動加速度レベル(直結軌道10Hz加振時応答からの相対値)を求めた結果を図5に示す。防振まくらぎは31.5Hzの共振周波数より高周波数域で振動が低減されている。一方、防振マット軌道の場合は、25Hzの共振周波数より高い周波数域で振動が低減されている。以下に各軌道条件の振動特性について(1),(2)の結果を踏まえて記した。

- 1) 防振マット軌道 ピークは25Hz付近であり、図3のカットオン周波数と一致している。当該の共振周波数以上の領域において防振効果が現れている。

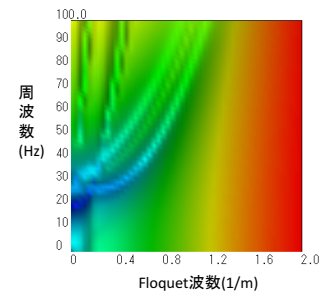
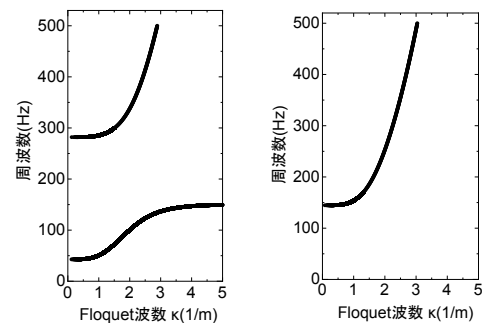


図3 防振マット軌道のトンネル振動特性



(a) 防振まくらぎ軌道 (b) 直結軌道

図4 軌道分散曲線

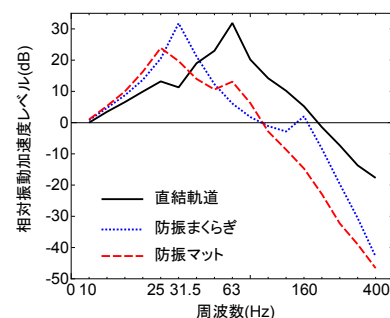


図5 相対振動加速度レベル

- 2) 防振まくらぎ軌道 車輪の負荷質量の影響で、共振周波数は軌道分散曲線のバンド端(40Hz)より低く31.5Hz付近となっている。

6. おわりに

防振まくらぎと防振マットには、現在使用されている中でも低剛性の防振材を想定しているが、後者の方がより低い共振周波数を有しており、63Hz前後以外の周波数域では相対dBも低い。よって、防振マット工法には、防振まくらぎと同等またはそれ以上の防振効果が期待できる。

参考文献

- 1) Clouteau, D., Arnst, M., Al-Hussaini, T.M. and Degrande, G.: Freefield vibrations due to dynamic loading on a tunnel embedded in a stratified medium, J. Sound Vib., Vol.283, 173-199, 2005