

地下鉄の軌道構造が振動特性に及ぼす影響の 三次元解析による評価

新潟大学大学院 学生会員 佐藤 大輔
新潟大学 正会員 阿部 和久
東京都地下鉄建設(株) 正会員 古田 勝

1. はじめに

地下鉄車両の走行に伴い発生する振動は、周辺環境に影響を及ぼし得るため、軌道の設計や管理面において重要な問題の一つとなっており、様々な防振対策が講じられている。しかし、防振対策で得られる効果を事前に予測することは難しく、現状では試験敷設区間での実測に基づく評価に因らざるを得ない。これに対し、本研究では地下鉄軌道を対象に軌道振動解析手法を構成し、数値シミュレーションによる振動特性の評価を試みてきた^{1),2),3)}。そこで本研究では、三次元振動解析手法を用いパッド類のバネ定数が軌道の振動特性に及ぼす影響について考察する。

2. 三次元振動解析

本研究では車輪・レール・まくらぎ・道床・路盤等から成る連成系を対象とする。車輪は一定速度で走行する2車輪を質点でモデル化する。レールは無限長 Euler ばりによりモデル化する。まくらぎは、弾性ばりによりモデル化し、レールおよび道床との接触力は共に左右対称と仮定する。軌道パッド、防振パッドは Voigt ユニットで表わす。ただし、パッド類の荷重-変位関係には明確な非線形特性が認められるので、それを考慮し時間域で解析を行う。車輪・レール・まくらぎ・道床以下については数値的 Green 関数を導入し、それと作用力との合成積により変位応答を記述している。

ここで、道床以下の地盤系について数値的 Green 関数を作成するために、道床・トンネル・地盤から成る部分を三次元波動場でモデル化し、離散化波数法⁴⁾を適用し各波数毎の準二次元問題に帰着させる手法を採る。なお、道床・トンネル・地盤の一部を有限要素で、周辺の無限地盤を境界要素で直接法に基づき離散化し解析を行う。

また、連成振動解析における振動源はレール頭頂面に設定した凹凸で表現し、車輪、軌道系における全ての不整をそれらと等価なレール凹凸として与える²⁾。

3. 解析例に基づく諸検討

(1) 再現性の検討

地下鉄都営新宿線で行われた列車走行時の振動測定を対象に、2. で構成した連成振動解析手法を適用する。道床はバラスト道床で、その下にコンクリート基盤がある。道床と基盤との間には、厚さ 25 mm のバラストマットが敷かれている。トンネルは、厚さ 250 mm の二次覆工コンクリートと、厚さ 300 mm の RC 平板セグメントにより構成されている。また、レールとまくらぎ間には公称バネ定数 110 MN/m の軌道パッドが、まくらぎと道床間には公称バネ定数 9 MN/m の防振パッドがそれぞれ敷設されている。

解析では、58 cm 間隔に配置されたまくらぎ 24 区間を対象とした。実測時の条件に合わせ車輪の走行速度を 20 m/s とし、 $\Delta t = 0.001$ s の下で連成解析を実行している。またレール凹凸は、観測点を含む 6.62 m 区間に渡り設定されている。その他の解析条件を表-1 に示す。

離散化波数法による動弾性三次元解析は、波数-周波数空間の各離散点における準二次元解析に帰着される。バラスト道床・トンネル・周囲の地盤の一部を有限要素で、その外部領域を境界要素で与えている。また、地下鉄軌道においては、100 Hz 以下の周波数域に振動レベルのピークが現われ、それが地盤中を伝わっていく波動の主要成分と考えられる。そこで、100 Hz 以下の振動成分が十分な精度の下に解析できるように地盤の要素長を設定した。離散化波数法での解析において、トンネル奥行き方向と時間方向の周期長は、その影響が十分無視できる程度に長く設定する必要があり、ここではそれぞれの周期長を $L = 14.848$ m、 $T = 0.512$ s とし、分割数をそれぞれ 512、1024 とした。この場合のトンネル奥行き方向と時間方向の解像度は 2.9 cm と 1/2000 s となる。以上に述べた分割数の下、波数-周波数空間の各離散点毎に解析を実行する。これら全ての離散点に対して解析を行うには多大な計算時間を要するが、これらの計算は各々独立に行えるので、本研究では PC クラスタを構築し、並列計算することで計算時間の短縮を図った。

以上に述べた諸条件の下で解析を行い、実測値および二次元モデルによる結果と比較した。レール、まくらぎ、待避所、トンネルにおける加速度の振幅スペクトルを図-1 に示す。レール、まくらぎ、待避所の加速度応答において、文

表-1 振動解析における条件

上載荷重	(kN)	36.75
バネ下質量	(kg)	350
接触バネ定数	(MN/m)	2000
接触減衰係数	(kN-s/m)	0
レール曲げ剛性	(MN-m ²)	4
レール質量	(kg/m)	50
軌道パッド	バネ定数 (MN/m)	110
	減衰係数 (kN-s/m)	650
防振パッド	バネ定数 (MN/m)	9
	減衰係数 (kN-s/m)	100
まくらぎ弾性係数	(MPa)	2×10^4
まくらぎ質量	(kg)	205

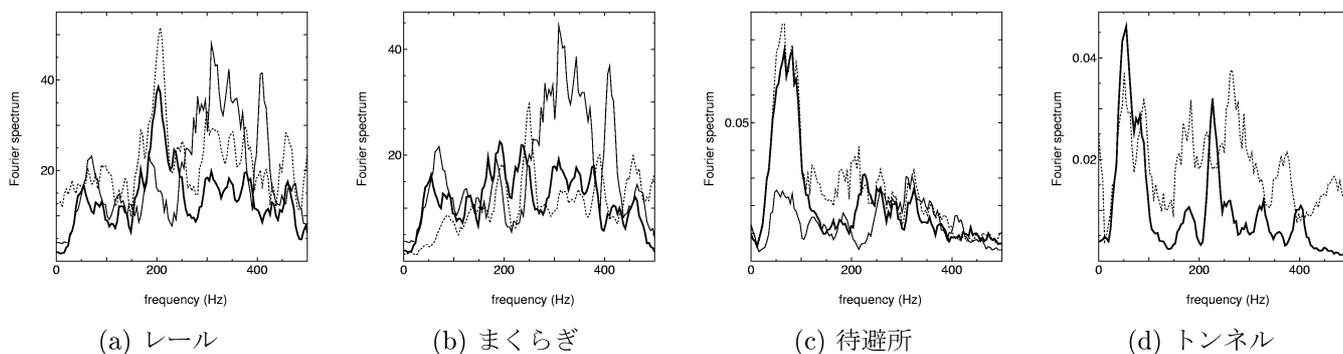


図-1 加速度振幅スペクトル (点線：実測値，細線：二次元モデル，太線：三次元モデル)

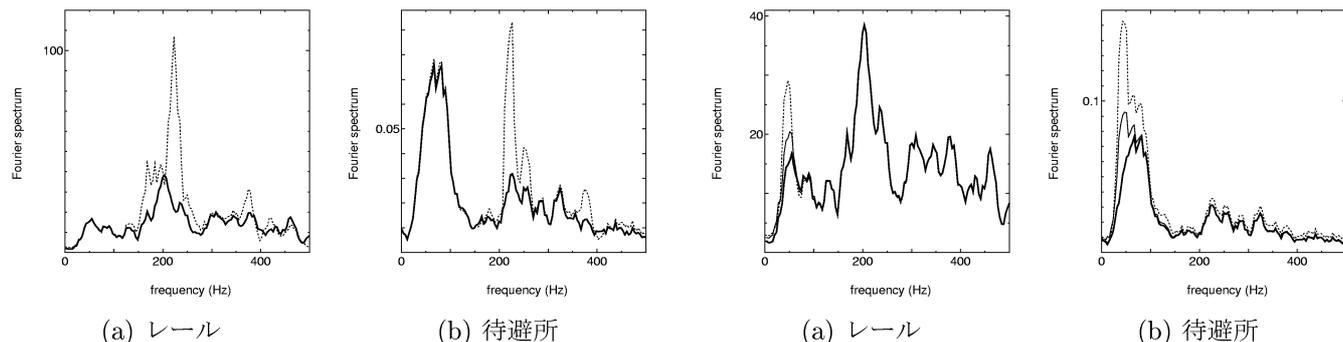


図-2 軌道パッドが振動応答に及ぼす影響 (点線：軌道パッドなし，細線：110 MN/m，太線：バネ定数 30 MN/m)

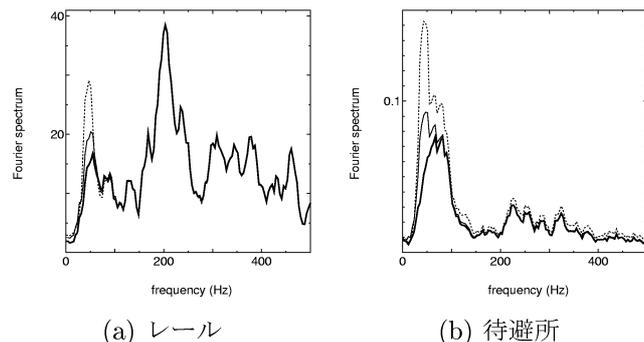


図-3 防振パッドが振動応答に及ぼす影響 (点線：防振パッドなし，細線：60 MN/m，太線：バネ定数 9 MN/m)

献 3)と同様に二次元モデルと比較して三次元モデルは実測値を良好に再現し、待避所では特に実測値において 100 Hz 以下の周波数域に見られるピークを適切に再現している。また、三次元モデルではトンネルでの振動応答の評価が可能であり、トンネルにおいても 100 Hz 以下の周波数域のピークを適切に再現している。

(2) パッド類のバネ定数が防振効果に及ぼす影響

次にパッド類の有無、そのバネ定数の違いが振動応答に及ぼす影響について、本手法による解析を通して調べる。軌道パッドを省略、バネ定数を 30 MN/m および基準値 110 MN/m とした場合の 3 ケースに対する解析結果を図-2 に示す。PC まくらぎの場合、まくらぎの破損を防止するため一般に軌道パッドが省略されることは無いが、ここでは軌道パッドの防振効果を調べる目的で、そのような場合も解析対象とした。図より、軌道パッドは 150 Hz 以上の周波数域において防振効果を発揮することがわかる。また、パッドのバネ定数の違いは防振効果に反映されない。軌道パッドのバネ定数を過度に低くすることは、レールの小返りや、レール締結部のゆるみなどを助長することとなる。そのためバラスト軌道の場合、通常公称バネ定数 70 ~ 120 MN/m 程度の軌道パッドが用いられるが、これは本解析結果からも妥当な設定であると言える。

次に、防振パッドの無いもの、バネ定数 60 MN/m および基準値 9 MN/m とした場合の 3 ケースに対する解析結果を図-3 に示す。図より、防振パッドは主に 100 Hz 以下の周波数域において防振効果を発揮することが分かる。特にその効果はレールより待避所において顕著であり、道床以下での振動低減に役立つことが確認できる。また、軌道パッドとは異なり、低バネ定数のもの程高い防振効果が得られることがわかる。

4. おわりに

道床-地盤系を三次元連続体とした解析手法を構成し、実測値の再現性について検討した。その結果、本手法は軌道系全体の応答特性を十分な精度で評価できることがわかった。さらに、本手法を用いてパッド類のバネ定数の違いが防振効果に及ぼす影響について調べた。

参考文献

- 1) 阿部和久, 須田雅樹, 古田勝: 車輪・軌道・地盤系の連成振動解析手法, 構造工学論文集, Vol.45A, 271-280, 1999.
- 2) 阿部和久, 鈴木貴洋, 古田勝: 軌道振動解析におけるレール頭頂面の凹凸形状の推定, 応用力学論文集, Vol.3, 107-114, 2000.
- 3) 鈴木貴洋, 阿部和久: 三次元地盤モデルを用いた軌道系連成振動解析, 平成 13 年度鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 121-124, 2001.
- 4) Bouchon, M. and Aki, K.: Discrete wave-number representation of seismic source wave fields, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.67, 259-177, 1977.