

地下鉄軌道の三次元構造を考慮した連成振動解析

新潟大学大学院 学生会員 鈴木 貴洋
 新潟大学 正会員 阿部 和久
 東京都交通局 正会員 古田 勝

1. はじめに

既存の軌道に対する防振対策の検討や維持管理において、振動加速度の周波数特性や軌道系の状態を把握することは重要であり、現況を数値シミュレーション上で再現することには意義がある。著者らはこれまでに、地下鉄軌道を対象に、道床以下を二次元連続体とした振動解析手法を構成し、実測の再現性について検討を行ってきた^{1)–3)}。しかし、地盤をも含めた軌道系全体の再現には、地下鉄トンネル部やまくらぎ長手方向への三次元的な波動伝播特性の考慮が重要であるとの結論に至った。そこで本研究では、道床-地盤系を三次元連続体とした車輪・軌道・地盤系の振動解析手法を構成する。そして、道床-地盤系の三次元モデルおよび二次元モデルによる振動解析結果と実測値とを比較することで再現性の検討を行う。また、道床以下のモデル化が振動特性に及ぼす影響についても検討を行う。

2. 道床-地盤系の三次元動弾性解析手法

本研究では、道床-地盤系の離散化手法として有限要素-境界要素 (FE-BE) 結合解法を用いた。ここで、三次元動的問題の解析手法として FEM や BEM を用いる場合、二次元問題に比べ解くべき方程式の元数が大きくなり、記憶容量や計算時間から制約が課されることとなる。また、三次元場を FEM では体積要素で、BEM では平面要素で要素分割する必要がある、その作業も煩雑なものとなる。

そこで、解析対象とする地下鉄トンネルを、レール長手方向に断面一様で真っ直ぐ無限に伸びている三次元場とみなし、レール長手方向の空間軸方向と時間軸方向に Fourier 変換することで、三次元動弾性問題を波数-周波数領域における準二次元定常問題に帰着させ、離散化波数法⁴⁾により実空間での解を構成する。なお、そのために FE-BE 結合方程式は像空間における準二次元無限領域を対象に構成することとなる。

軌道振動解析では、道床の運動を数値的 Green 関数に基づく合成積のかたちで与えている¹⁾。そのため、三次元動弾性解析を別途実行することで予め数値的 Green 関数を求めておき、ファイルに保存しておくものとする。

3. 解析

バラスト道床・バラストマット・コンクリートおよびトンネル周辺地盤は有限要素で、それより外側の無限地盤は境界要素で離散化している。三次元動弾性解析に際し、離散化波数法の適用からレール長手方向と時間方向には周期性が課されており、隣接周期からの影響を十分に無視し得るだけの周期長を設定する必要がある。試算の結果、空間・時間方向の周期長をそれぞれ 14.848 m, 0.512 s とし分割数をもとに 512 とした。

軌道上部は、58 cm 間隔に配置されたまくらぎ 24 区間を解析対象とし、測定時の条件に合わせ車輪の走行速度を $c = 20$ m/s とした。また、時間増分は実測データの記録間隔に合わせ 1/1000 s とした。

レール頭頂面の凹凸は測定点を中心に 6.62 m 区間に設定した。その他の条件を表-1 に示す。

以上の解析条件に基づき振動解析を行った結果を、二次元モデルによる解析結果および実測値と比較し、その適合性を検討する。ここで、二次元モデルでは文献 2,3) に基づき、実測を再現し得るように解析を行っている。各部における加速度の振幅スペクトルを図-1 に示す。三次元モデルでは、待避所 (コンクリート基盤) も含めた、軌道系全体の同時再現性の精度が二次元モデルに比べ向上していることが分かる。特に、実測値の待避所において見られる 50 Hz 近傍のスペクトルピークを良く再現できている。一方、二次元モデルでは、各部の振動特性を同時に再現することが

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	バネ定数 (MN/m)	公称 110
パッド	減衰係数 (KN·s/m)	650
防振	バネ定数 (MN/m)	公称 9
パッド	減衰係数 (KN·s/m)	100
まくらぎ弾性係数 (MPa)		2×10^4
まくらぎ重量 (Kg)		205
PC 鋼棒弾性係数 (MPa)		1.9×10^5

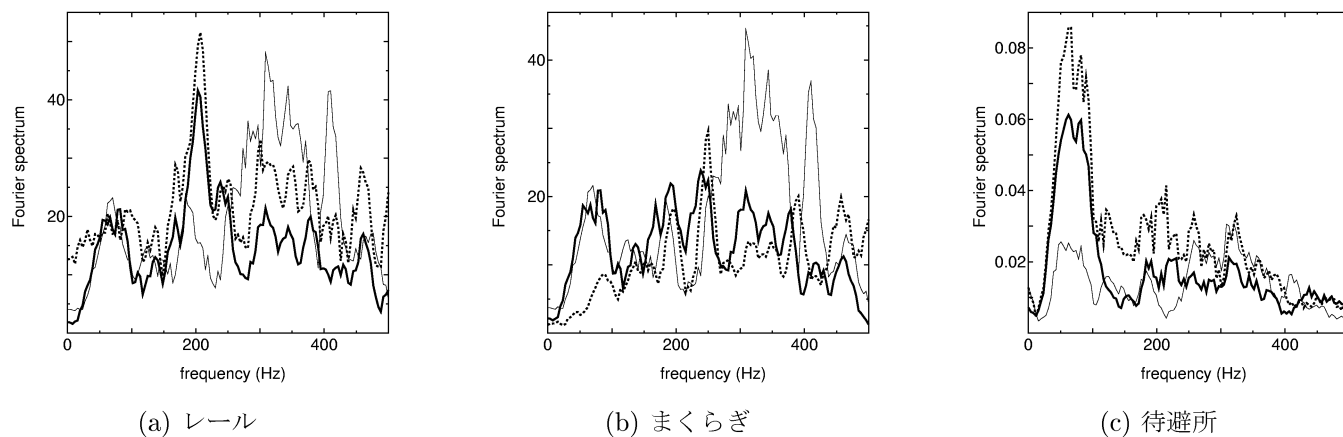


図-1 加速度振幅スペクトル (太線：三次元モデル，細線：二次元モデル，点線：実測値)

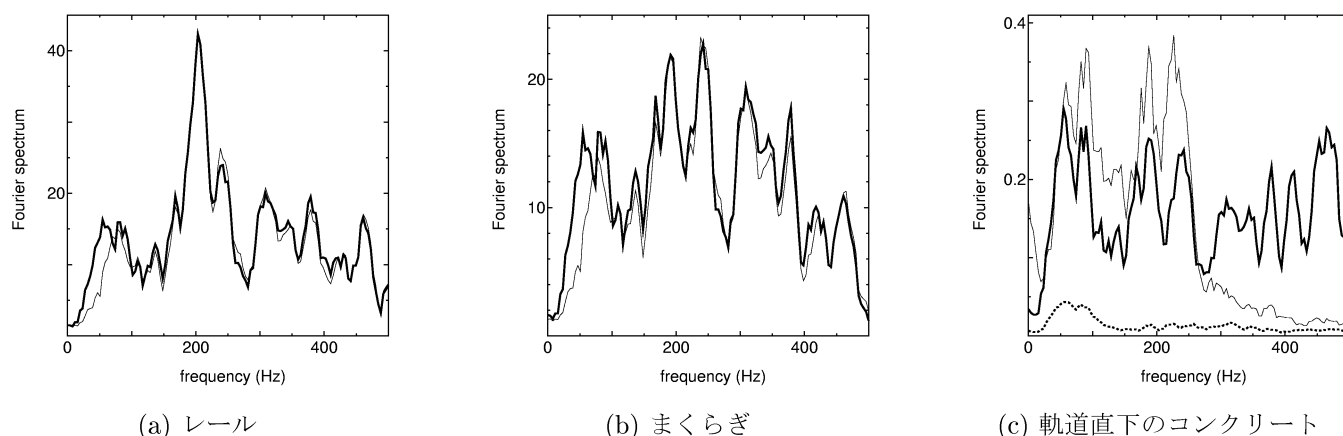


図-2 加速度振幅スペクトル (太線：三次元モデル，細線：二次元モデル，点線：待避所)

困難であることが分かる。これは、三次元モデルにより測定位置に対応した点での加速度の評価が可能になったことに加え、トンネルの振動特性などが適切に再現されたことによるものと考えられる。

次に、道床以下のモデル化が振動特性に及ぼす影響について検討する。ここでは、道床以下の材料特性、振動解析における諸パラメータ値を二次元・三次元モデルともに同一のものを設定した。なお、二次元モデルでは軌道直下の振動特性しか評価できないため、各モデルで軌道直下のコンクリート基盤上端面の振動特性について比較することとした。各部における加速度の振幅スペクトルを図-2に示す。レール、まくらぎでは100 Hz以下においてスペクトルレベルに差があるものの、モデル化による大きな違いは見られない。軌道直下のコンクリートでは、250 Hz以下ではほぼ同じ結果が得られており、まくらぎ直下であれば二次元モデルでも概ね良好な結果が得られることが分かった。なお、図-2(c)には、三次元モデルによる待避所の振幅スペクトルも合わせて示してあるが、軌道直下のコンクリートと比べるとスペクトルレベルが大きく異なっていることが分かる。このことより、軌道直下と待避所の振動特性の違いは明確であり、二次元モデルにより軌道直下以外の振動特性を把握することが非常に難しいことが分かった。

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、実測値との適合性について検討を行った。その結果、軌道系全体の周波数特性を実測値と概ね一致させることができた。特に、軌道直下以外の振動特性を評価できるようになり、より現実的な振動特性を予測することが可能になった。

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, pp.271-280, 1999.
- 2) 鈴木貴洋, 阿部和久, 古田勝: ニューラルネットワークによる軌道振動系の物性値同定, BTEC 論文集, Vol.10, pp.55-60, 2000.
- 3) 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, pp.107-114, 2000.
- 4) Bouchon, M and Aki, K: Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.67, No.2, pp.259-277, April 1977.