

## 動的連成解析に基づく軌道の不整と地盤振動の関係の検討

防災技術研究部 地質

主任研究員 横山秀史

### 1. はじめに

列車走行により沿線で生じる地盤振動の大きさに影響する要因の一つに、軌道変位やレール頭頂面の凹凸等による軌道の不整が考えられる。近年、比較的土被りの小さい在来線トンネルにおいて、レール頭頂面の凹凸により地盤振動が顕著に増大した事例<sup>1)</sup>が報告され、軌道の不整による影響が無視できない場合があることが確認されている。ここでは、車両・軌道・構造物系の動的解析モデルを作成し、軌道の不整と地盤振動の関係について新幹線を対象に検討した結果について紹介する。

### 2. 軌道の不整による地盤振動への影響事例<sup>1),2)</sup>

比較的土被りの浅い在来線の複線トンネル上で、上り列車通過時と比較して下り列車通過時の振動が10dB程度大きいという事象が報告されている<sup>1)</sup>。卓越周波数(25~40Hz程度)と列車速度の関係より、当該箇所では0.4~0.5m程度の波長に対応する振動成分が卓越しており、車両の軸距等に対応する長さの成分が無いことから、軌道状態等の地上側の要因について調査した。その結果、下り線の曲線外軌側レール頭頂面の全般にわたって波長約0.45mで連続した凹凸が確認されている。一方、上り線側にはこのような連続凹凸はみられていない。

当該箇所付近の振動増大の原因がレール頭頂面の凹凸と推定されたことから、振動対策として下り線左右レールの取替および軌道パッドの低ばね化を実施した結果、下り列車の振動は対策前と比較して10dB程度低減し上り列車とほぼ同程度となった<sup>2)</sup>。

この事例において振動対策前に卓越していた周波数帯域(25~40Hz程度)は、新幹線の速度域(260~300km/h程度)では波長2~3m程度の軌道不整に対応する。25~40Hz付近の周波数帯域は新幹線等の明り区間においても地盤振動の主要帯域の一つであることから、新幹線の明り区間における地盤振動に対する軌道不整の影響について再検討した。

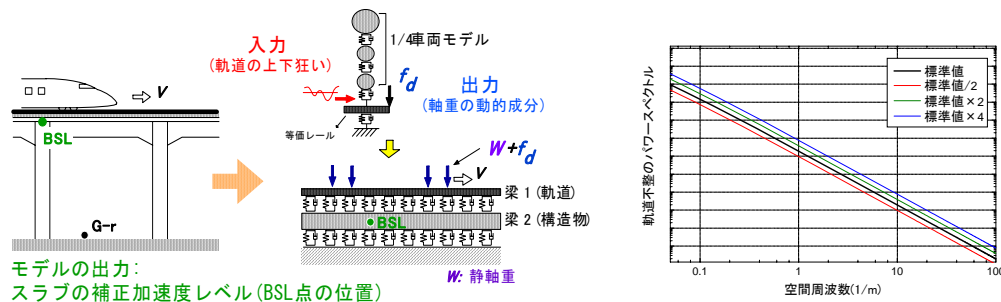


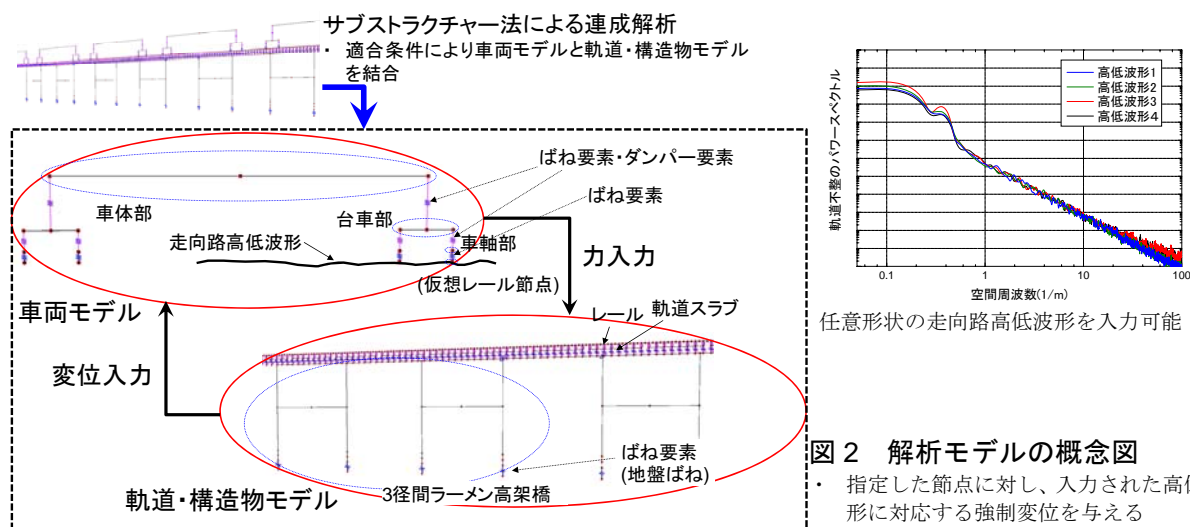
図1 既往の新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル<sup>3)</sup>(軌道不整スペクトルの形状は固定)

軌道の不整の影響については既往の新幹線鉄道振動モデル<sup>3)</sup>(図1)においても考慮されており、

軌道不整スペクトルの大きさを変えた際の地盤振動スペクトルの変化について基礎検討が行われている。しかしこのモデルでは図 1 に示すように軌道不整スペクトルの形状が固定されており、軌道不整の影響を詳細に検討することは困難である。そこで、任意形状の走向路高低波形を入力できる交通荷重解析プログラムを用いて車両・軌道・構造物系の動的連成解析を行い、軌道変位やレール凹凸等の軌道の不整の影響を検討した。

### 3. 車両・軌道・構造物系の動的解析の概要

車両・軌道・構造物系の動的解析は、汎用の交通荷重解析プログラム DALIA<sup>4)</sup>を使用し、8両編成の新幹線車両モデルおよび3径間の標準ラーメン高架橋モデルを作成して行った。このプログラムでは、サブストラクチャー法により車両と軌道・構造物の動的連成解析を行う(図 2)。



軌道の不整に詳細に対応する走行路高低波形(図 2)を入力することで、車両モデルに対して軌道の不整に起因する変位を与えることができる。要素は全て線形要素である。

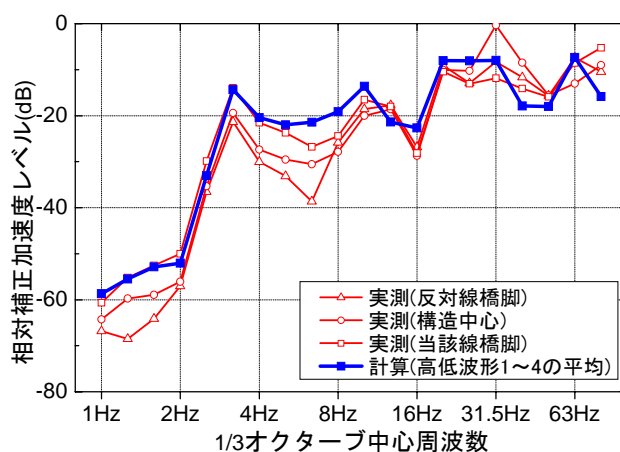
車両は車体および台車を剛な梁、車軸を集中質量でモデル化し、車体・台車・車軸の各々の重心位置には重力に相当する節点荷重を与えた。車輪・レール間の接触ばねを模擬するため、車両モデルの車軸節点と仮想レール節点間はばね要素で接続した。

構造物は中層梁のある直接基礎の3径間標準ラーメン(スパン 8m×3)を梁要素でモデル化し、ブロック間はスパン 9m のゲルバー梁で連結した。また、地盤については鉛直・水平・回転の3成分のばねでモデル化した。地盤ばね定数は測定箇所の地盤(深さ 2m 以下は N 値 50 以上の粘性土および砂質土)および基礎に対する設計標準のばね定数を用いた。

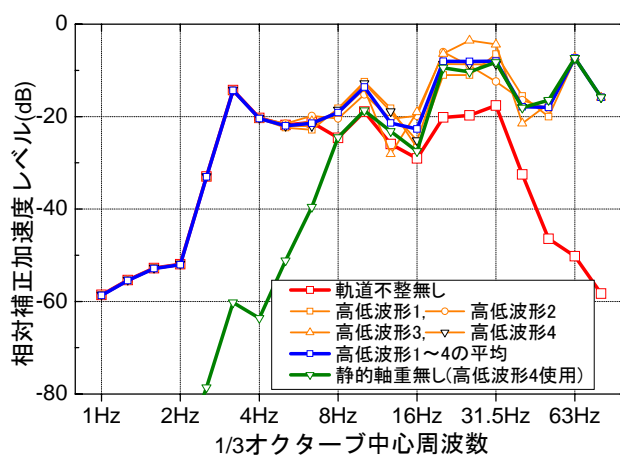
軌道部は、レール 2 本分と軌道スラブを梁、軌道パッド(公称ばね値 60MN/m)をばねおよびダッシュポットでモデル化した。軌道パッドのばね定数は、レール変位が実測値と適合するように定めた。軌道スラブの支持ばねは硬質樹脂による全面支持として設定した。また、バラスト軌道の場合は、まくらぎおよび道床質量を一つの集中質量要素でモデル化し、これを道床相当のばねおよびダッシュポットで支持する簡易モデルとした。ラーメン高架橋は全部で3ブロック作成し、主として中央のブロックを評価対象とした。解析領域のうち両端の緩衝区間を除いた構造物部分は 90m である。

図 2 の動的解析モデルによる解析結果を図 3 に示す。ここでは、スラブ軌道区間の高架橋直近地盤 3 点での実測値を対応する位置の橋脚基部の振動加速度の解析結果と比較した。評価にあたっては、3 点の補正加速度レベル実測値の平均が 0dB となるように正規化した。モデル上の走行路高低波形は、スラブ軌道区間での軌道変位の実測値(1m サンプリング)4 セットの各々に、別途ランダムに発生させた短波長の軌道不整波形(レール頭頂面の凹凸等に対応)を加えて作成した。

図 3(a)から、5~8Hz 帯域で実測値より解析値の方が大きいものの、周波数ごとの補正加速度レベルの傾向は概ね再現できていることがわかる。次に、図 3(b)から走行路高低波形による計算結果の変化をみると、10Hz 以下の帯域ではいずれの高低波形の場合もほぼ同じ補正加速度レベル値であるのに対し、12.5Hz 以上の帯域では解析に用いた走行路高低波形の違いによる振動変化が大きい。軌道不整の影響を検討するため、モデルから高低波形を除いて



(a)実測結果と解析結果の比較



(b)走行路高低波形による解析結果の変化

図 3 スラブ軌道区間の動的解析結果

(速度 278km/h、実測された振動加速度レベルの平均値を 0dB)

計算した結果(図中の「軌道不整無し」)に着目すると、16Hz 程度以下の周波数帯域では軌道不整がある場合と概ね同程度の振動であるのに対し、20Hz 以上の帯域では軌道不整がある場合よりも顕著に振動が小さく、40Hz 以上の帯域では 10~15dB 程度以上の差が生じている。また、車両モデルから重力に相当する節点荷重を除いて計算すると(静的軸重無し)、概ね 10Hz 程度以下の周波数帯域で他のケースよりも振動が小さく、特に 6.3Hz 以下の低周波帯域では振動がほとんど生じていないのに対し、16Hz 以上の帯域では、他のケースとほぼ同程度の振動が生じていることがわかる。

#### 4. マルタイ施工前後の振動変化

3 章に示すモデルを用いて、マルタイ施工による軌道変位の変化が地盤振動に与える影響について検討した。軌道モデルは有道床軌道モデルとし、走行路高低波形は 3 章と同様にマルタイ施工前後の軌道変位の実測値(1m サンプリング)3 セットの各々に、別途ランダムに発生させた短波長の軌道不整波形を加えて作成した。なお、短波長波形については、マルタイ施工前後で同一のものを用いた。

マルチ施工前後の補正加速度レベルと走行路高低波形スペクトル変化量の関係を図4に示す。ここで、スペクトルの変化量は3種類の軌道高低波形に対する計算結果の平均である。また、振動加速度は評価位置によっても異なるため、振動加速度変化量は中央のラーメンを構成する4柱と終点方のラーメンの1柱目の計5箇所の平均により評価した。なお、走行路高低波形は車両に対しては列車速度に応じて時間変化する強制変位として作用するため、図4では列車速度が278km/hの時のスペクトル変化を示した。図4の計算結果

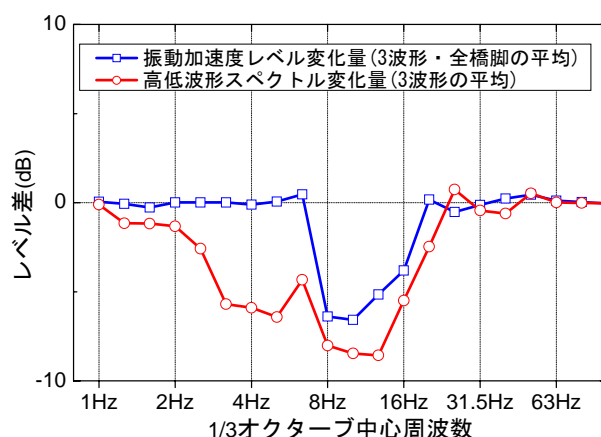


図4 マルタイ施工前後の振動および走行路高低波形スペクトルの変化(施工後と施工前のレベル差)

よりマルチ施工前後の振動加速度と高低波形の変化をみると、8~16Hz付近の帯域では両者がよく対応しており振動加速度の低減量は3~6dB程度であった。一方、6.3Hz以下の低周波帯域の振動変化はごく小さく、軌道の不整に起因する軸重変動の影響はほとんどみられなかった。なお、25Hz以上の帯域の振動変化が小さいのは、実測波形が1mサンプリングであるため、波長3m程度以下(概ね25Hz以上の振動加速度成分に対応)の成分が含まれないことが原因と考えられる。

## 5. まとめ

汎用の移動荷重解析ツールを用いて新幹線の車両・軌道・構造物系の連成振動モデルを作成し、軌道の不整と地盤振動の関係について検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (a) 数値シミュレーションで得られた橋脚下部の振動は橋脚近傍地盤での実測結果と概ね一致しており、鉛直方向の地盤振動はこのモデルである程度再現可能と考えられる。
- (b) 作成したモデルを用いて、入力する軌道不整波形の違いによる地盤振動への影響を検討した。マルチ施工前後の軌道不整波形(1mサンプリング)を用いた計算結果では、8~16Hz付近の帯域の振動加速度の変化が当該の周波数帯域での軌道変位に起因する車両への強制変位スペクトルの変化に対応していることがわかった。また、6.3Hzより低い周波数では静的軸重の影響が大きく、軌道不整の違いが解析結果に与える影響が小さいことを確認した。

## 参考文献

- 1) 柳澤義春・興石逸樹：首都圏に位置するトンネルでの地盤振動対策、日本鉄道施設協会誌、Vol. 43、No. 8、2005.
- 2) 岩田直泰・横山秀史・芦谷公稔・斎藤聡：波状摩耗レールの更換による地盤振動特性の変化、鉄道力学論文集、No. 10、2006.
- 3) 吉岡修・芦谷公稔：新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル、物理探査、Vol. 48、No. 5、1995.
- 4) 矢部明人：サブストラクチャー法を用いた移動体と構造物の動的相互作用解析手法の開発、土木学会第61回年次学術講演会、2007.