

シミュレーションを用いた軌道不整による地盤振動への影響評価

防災技術研究部 地質研究室

主任研究員 横山 秀史

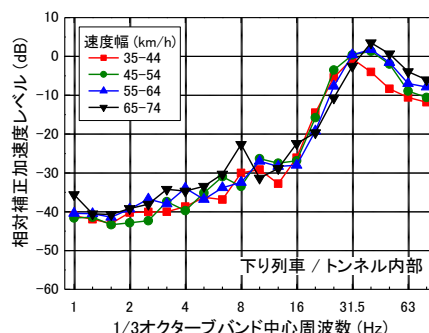
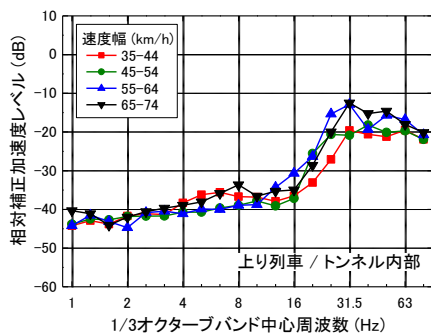
1. はじめに

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鉄道トンネルにおいて、レール凹凸により地盤振動が顕著に増大した事例^{1), 2)}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、トンネル区間および平地を想定した車両・軌道・構造物系の動的解析モデルを作成し、軌道の不整による地盤振動への影響について検討した結果を紹介する。

2. 軌道不整による地盤振動への影響の事例^{1), 2)}

既往のシミュレーションによる検討では、軌道の不整は主として31.5Hz程度以上のある程度高い周波数帯域の地盤振動に対する影響要因の一つとして考えられていた³⁾。近年、在来線トンネル上で0.4~0.5m程度の波長のレール凹凸に起因し25Hz以上の周波数帯域で振動が増大¹⁾した事例や、新幹線トンネル上で波長2.5m程度のレール凹凸に起因し12.5~16Hz帯域で振動が増大した事例²⁾等が報告されている。図1に在来線トンネルにおける測定結果の例を示す。この図より、

レール凹凸の大きい下り側の振動が上り側よりも10~15dB程度大きいことがわかる。これらの事例においては、対策として在来線トンネルの事例ではレール交換、新幹線トンネルの事例では長波長レール削正をそれぞれ実施



(a)上り側(レール凹凸小)

(b)下り側(波長0.45m前後のレール凹凸有)

図1 在来線トンネルにおける事例¹⁾

※地上測定点の振動レベルの最大値を0dBとして正規化

し、レール凹凸の波長に対応する周波数帯域の振動を6~15dB程度低減させた。

これらの事例では、新幹線等の明り区間における地盤振動の主要帯域(20Hz~40Hz程度)を含む周波数帯域で振動が増大していることから、軌道不整の大きさ等によっては明り区間においても軌道不整の影響を無視できない可能性があると考えられる。そこで、車両・軌道・構造物系の動的連成解析モデルを用いたシミュレーションにより、軌道不整と地盤振動の関係について検討した。車両・軌道・構造物系の動的解析には、汎用の交通荷重解析プログラムDALIA⁴⁾を使用した。

3. 車両・軌道・構造物系の動的解析モデルの基礎検討

3.1 在来線トンネルの解析例

解析モデルの適用性を確認するため、在来線トンネルにおける対策箇所¹⁾を対象として動的解析を行い実測結果と比較した。当該箇所はスラブ軌道区間であり、解析で得られた路盤部の振動を軌道脇の路盤における振動測定結果と比較した。軌道不整については、文献 1)に示されたレール凹凸測定結果を参考に、下り側については片振幅 0.5mm、波長 0.45m の正弦波で近似した。上り側については読み取りが困難であるため、片振幅 0.1mm、波長 0.45m の正弦波を仮に設定し解析した。

結果を図 2 に示す。今回の検討では軌道不整を単一波長の正弦波でモデル化したことや、解析プログラムの特性により実測と比較しピークの現れる周波数帯域が狭いが、ピーク値である 40Hz 帯域の振動加速度レベルは実測とおおむね対応していることが確認できた。

3.2 新幹線トンネルの解析例

新幹線トンネルの有道床軌道区間で長波長レール削正を実施した箇所²⁾を対象に、削正前後の軌道不整波形を用いて動的解析を行った結果を図 3 に示す。この図より、25m~65m の区間のように削正により軌道不整が大きく低減された箇所では振動低減量が大きく、65~75m 区間のように軌道不整の変化が小さい箇所では振動低減量も小さいことなどが確認できる。

また、図 3 の 50m 点のトンネル側壁で実施された振動測定結果を 45~55m 区間の解析結果と比較した。測定はトンネル側壁で実施されており²⁾、解析で得られた路盤振動との直接的な比較は困難であるが、削正前後の 12.5~16Hz 帯域の振動

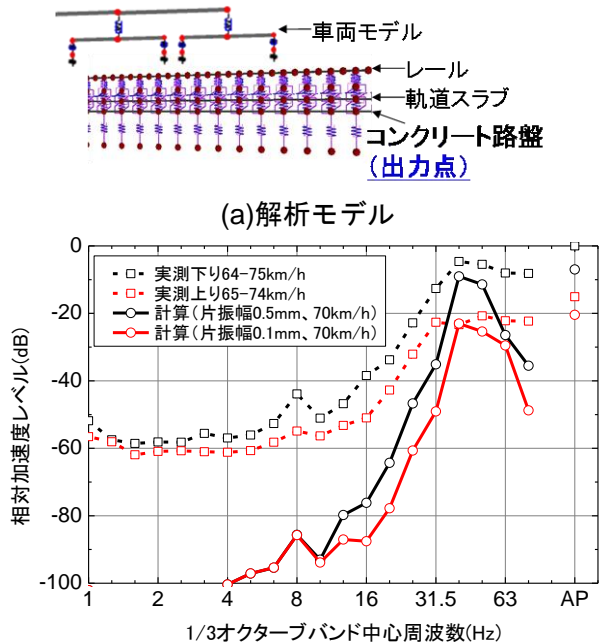


図 2 在来線トンネルの解析結果
(速度 70km/h, 実測された振動加速度レベルの最大値を 0dB)

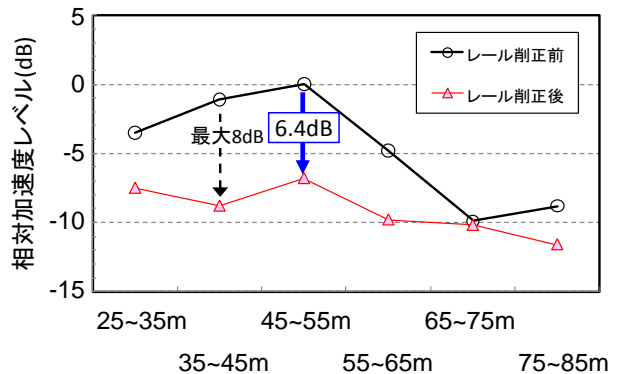
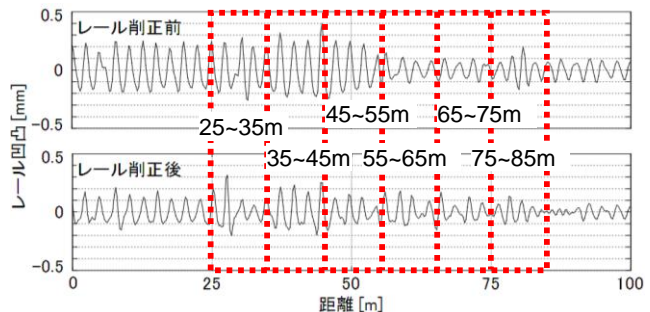


図 3 新幹線トンネルの解析結果
(速度 120km/h, 振動加速度レベルの最大値を 0dB)

低減量は約 6dB であり，解析結果(6.4dB の振動低減)は実測とおおむね一致する結果が得られた。

4. 軌道不整による地盤振動への影響に関するパラメータスタディ

前章の検討により解析モデルの基本的な妥当性が確認できたことから，軌道不整が地盤振動におよぼす影響を定量的に把握するため，簡易な地盤振動シミュレーションモデルを用いてパラメータスタディを行い，軌道不整の波長および振幅と地盤振動の関係を整理した。なお，今回検討に用いたプログラムは 50Hz 以上の周波数帯域の再現性に課題があることから，本検討では 40Hz までの周波数帯域について検討した。

検討に使用したモデルおよび検討した軌道不整等の概要を図 4 および表 1 に示す。高架橋やスラブ軌道などの場合，構造物や軌道スラブの長さや固有振動特性等に起因する振動と軌道不整に起因する振動を分離して評価する必要があるため，問題が複雑になる。今回の検討では軌道不整の影響について基礎的な特徴をつかむため，構造物や軌道が特徴的な長さ等を持たない平地のバラスト軌道に相当するモデルを用いて検討した。また，車両は新幹線の車両モデルを用いた。

異なる軌道不整波形に対して路盤の振動加速度を計算した結果の例を図 5 に示す。計算で得られた路盤の振動加速度と軌道不整の振幅の関係をみると，軌道不整の影響を受ける周波数帯域や振動の大きさなどは軌道不整波形により異なるが，軌道不整の振幅がある限度値より小さいときには振幅が増大しても発生する地盤振動はほとんど変化せず，軌道不整の振幅が限度値よりも大きくなると振幅にほぼ比例して振動が増大するという特徴は軌道不整波形に関わらず同一である。

このような特徴を生じる理由を明らかにするため，シミュレーションで得られた路盤の振動加速度波形を性質の異なる二つの振動成分に分離した上で，各々の寄与度を整理した。一つは軸重の移動に起因する振動のように，同じ形状の波形が列車の到達時刻に対応する時間差を持ってあらわれる成分，もう一つは軌道不整に起因する振動など場所に固有の起振力が原因で生じる振動成分である。計算で得られた路盤振動波形は，よく似た形状の波形が列車の到達時刻に対応する時間差を持って並ぶ傾向がある。このような波形を，列車の到達時刻を基準に時間遅れを補正した上で平均することで，軸重等に起因する振動成分だけを取り出すことができる。具体的には，列車が各々の場所に到達した時刻が同じ時刻（例えば 0.3 秒）になるように，各地点の路盤振動波形の時間軸をずらした上で平均するという処理を

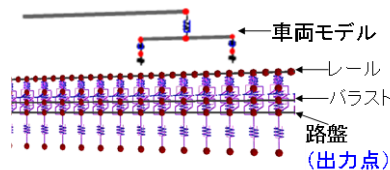


図 4 解析モデル

表 1 パラメータの範囲

パラメーター	範囲
波形	正弦波, 矩形窓付き正弦波
波長(m)	1~40(6 ケース)
片振幅(mm)	0.001~10(17 ケース)
列車速度 (km/h)	200, 270, 330(3 ケース)

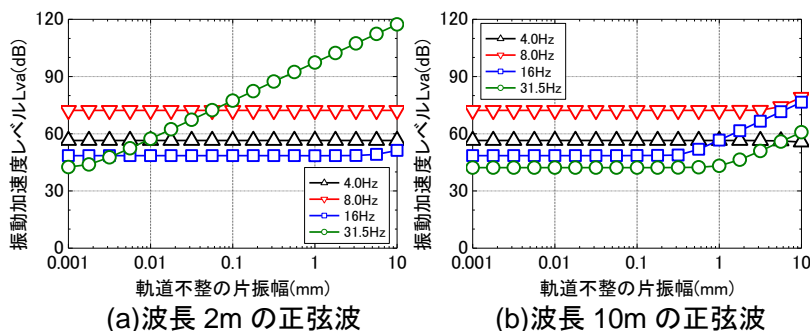


図 5 パラメータスタディ結果の例

(列車速度 270km/h=75m/s の場合の路盤の振動加速度)

行う。また、このようにして求めた軸重等に起因する振動成分を元の振動波形から引くことで、軌道不整等に起因する振動成分を求めることができる。

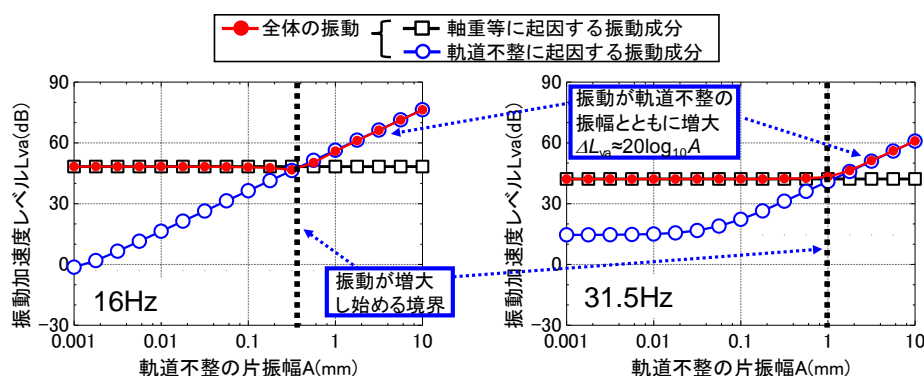


図6 振動成分への分離結果

(波長 10m の正弦波, 列車速度 270km/h=75m/s の場合の路盤の振動加速度)

このようにして

分離した振動成分ごとに軌道不整の振幅と路盤振動の関係を整理した結果を図6に示す。この図より今回の検討では、軌道不整の振幅が小さいときには軸重等に起因する振動成分が支配的で軌道不整による影響が小さいことや、軌道不整の振幅がある程度大きくなると軌道不整に起因する振動成分が支配的になるため、軌道不整の振幅増大とともに地盤振動が増大することなどが確認できた。

5. まとめ

軌道の不整による地盤振動への影響を評価するため、汎用の移動荷重解析ツールを用いて在来線および新幹線の車両・軌道・構造物系の連成振動モデルを作成し、モデルの再現性を確認するとともに、パラメータスタディにより軌道不整の波長および振幅と地盤振動の関係を整理した。結果をまとめると以下のとおりである。

- (a) 在来線および新幹線の事例について数値シミュレーションを行い、モデルによる実測値の再現性を確認した。
- (b) 作成したモデルを用いてパラメータスタディを行い、軌道の不整による地盤振動への影響を検討した。その結果、軌道不整の振幅が小さい場合には軸重等に起因する振動が支配的であり軌道不整の影響が小さいことや、軌道不整の振幅が大きい場合には軌道不整に起因する振動が支配的であり、軌道不整の振幅にほぼ比例して振動が増大することを確認した。

今後は、軌道や構造物の条件が異なる場合についてパラメータスタディを行い、軌道不整の除去による地盤振動の低減効果を定量的に評価する方法について検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 岩田直泰・横山秀史・芦谷公稔・斎藤聡：波状摩耗レールの更替による地盤振動特性の変化，鉄道力学論文集，No.10，2006.
- 2) 田中博文・古川敦・横山秀史・長谷川雅彦・金尾稔：新幹線沿線における環境振動低減のための軌道側対策と評価，鉄道総研報告，Vol.24，No.12，2010.
- 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，No.48，Vol.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.