

高速列車走行時のバラスト・ラダー軌道の地盤振動特性解析

渡辺 勉* 曾我部 正道* 奥田 広之*

庄司 正弘** 島袋 ホルヘ**

A Study of Ground Vibration of Ballasted Ladder Track Induced by High Speed Train

Tsutomu WATANABE Masamichi SOGABE Hiroyuki OKUDA

Masahiro SHOJI Jorge SHIMABUKU

There are some cases known that the ballasted ladder track, which is used in some meta-gauge lines now, has the property to reduce ground vibration. In this study, 3D-numerical model which consists of the track structure and the ground was developed. The authors carried out parametric analyses in order to study the property of ground vibration of ballasted ladder track induced by high-speed train. As a result, compared with the conventional crosstie tracks, the ballasted ladder track has the property to reduce ground vibration on such soft ground as having shear wave velocity of 80m/s.

キーワード：バラスト・ラダー軌道，地盤振動，高速列車，三次元数値解析

1. はじめに

線路方向に高い剛性を有するバラスト・ラダー軌道は、保守省力効果および軌道の高座屈安定性などの特長を有することが、これまでの実験などを通じて明らかにされている^{1), 2)}。また、在来線に導入された区間において、地盤振動低減効果が確認された事例も見られる。しかしながら、当該軌道の地盤振動特性についてはこれまで定量的な検討は行われておらず、新幹線などの高速列車走行時における地盤振動特性についても未解明であった。定量的な検討が困難となる理由としては、列車走行による振動伝播を再現するためには、ある程度の列車走行距離を考慮できる三次元的な広がりを持つ解析モデルが必要となること、地盤振動で対象となる80Hz程度までの高周波数帯を再現するために詳細なモデル化が必要となることなどにより、大規模かつ精密な三次元数値解析モデルが必要となることが挙げられる。

以上のような背景から、本研究では、以下の内容について検討を行うこととした。なお、解析対象とするのは鉛直方向の地盤振動である。

- (1) 高速列車走行による地盤振動を解析できる三次元数値解析モデルを構築し、試験軌道の定点加振試験により解析モデルの検証を行う。
- (2) 各種パラメータに着目した数値解析によりバラスト・ラダー軌道の地盤振動低減効果の検討を行う。

2. 数値解析モデルの構築

本研究では、地盤と構造物の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/3D を用いて数値解析モデルを構築した。

2.1 軌道および地盤モデルの構築

図1に解析モデルを、表1にモデルに用いた要素を示す。同図に示すように、軌道中心を対象境界とする1/2モデルで、ラダー軌道および比較検討用の横まくらぎ軌道を構築した。

列車走行によって発生する周辺地盤への振動伝播を評価するためには、ある程度の列車走行距離を考慮できる三次元的な広がりを持つ解析モデルが必要となる。しかし、軌道構造と周辺地盤すべてを有限要素法でモデル化すると、解析自由度が膨大になるとともに、解析時間も長時間となり、実用的な解析モデルを構築することができない。そこで、地盤より上の軌道構造については有限要素法によりモデル化するが、周辺地盤は薄層要素法³⁾により層分割し、成層地盤としてモデル化した。地盤の深さ方向の境界条件は、半無限地盤を模擬した粘性境界とし、側方については、解析的に無限遠方まで応答を求めることができる。地盤に薄層要素を用いることにより、解析自由度を大幅に減少させ、ラダー軌道および横まくらぎ軌道の構造的な違いを詳細にモデル化することを可能にした。

2.2 数値解析手法の検討

SuperFLUSH/3D は三次元の地盤-構造物連成系モデルの動的相互作用問題をサブストラクチャー法に基づいて解析するプログラムである。本研究では、前述のよう

* 鉄道力学研究部（構造力学）

** (株)構造計画研究所

特集：鉄道力学

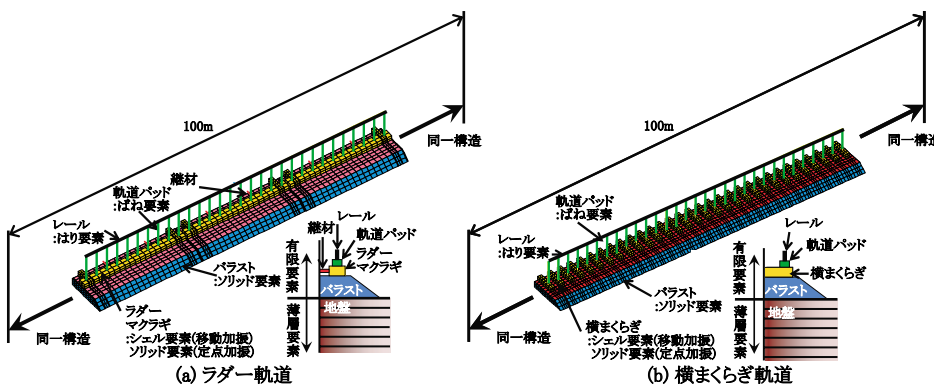


図1 解析モデルの概要

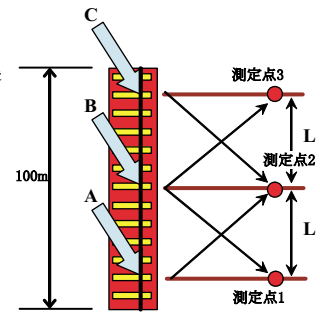


図2 加振点と応答の関係

に軌道構造を有限要素で、地盤を薄層要素でモデル化し、両者の力と変位の連続性や加振源に対する地盤の応答を薄層要素法による点加振解を用いて評価した⁴⁾。応答解析は複素応答法を用いた線形解析である。

具体的な解析手順は、構築した三次元モデルの軌道上の加振点（レール節点）から地盤の各応答評価位置までの伝達関数を軌道構造-地盤系全体モデルにおける加振解析によって計算する。ここで求めた伝達関数に、軌道加振力の時刻歴データをフーリエ変換したものを掛け合わせることで、周波数領域での応答が求められる。これをフーリエ逆変換することによって応答評価位置での時間領域での応答が求められる。

2.3 軌道加振モデルの構築

列車走行を再現するために加振点をレール節点上に複数設定し、それらに列車速度に応じた位相差をつけて加振（位相差加振）を行った。ここで、レール上の節点すべてを加振すると解析時間が膨大になる。そのため、解析効率を向上させるために軌道の連続性を考慮して、加振点はレール全節点ではなくモデル中央の一部のレール節点とし、解析上の測定点を地盤上に複数設けておき、位相差加振による各測定点の応答を列車速度から決まる時間のずれを考慮して足し合わせることで、地盤の応答を求めることとした。具体的には、図2に示すように、加振点Aに対する測定点2の応答 R_{A2} が、加振点Bに対する測定点3の応答 R_{B3} と等しく、同様に R_{C2} と R_{B1} は等しいと考えると、列車がある速度で $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ と進んだときの測定点2の応答 $R_2(t)$ は式(1)で表される。

$$R_2(t) = R_{A2}(t) + R_{B2}(t) + R_{C2}(t) = R_{B3}(t - \Delta t) + R_{B2}(t) + R_{B1}(t + \Delta t) \quad (1)$$
 ここで、 t は時刻、 Δt は応答評価位置と測定点との列車速度から決まる時間のずれである。これにより、計算すべき伝達関数の数を減らすことができ、解析の効率化を図ることができる。

以上の手法によって、横まくらぎ軌道における軌道加振力モデルを構築した。ラダーマクラギのユニット長は6.25mで、片側1レールあたり10締結である(0.625m間隔)。

したがって、レール上の節点10箇所に位相差加振を行い、地盤での応答を時間のずれを考慮して適切に重ね合わせれば、ラダー軌道においても時刻歴応答を得ることができる。なお、バラスト・ラダー軌道に合わせて、横まくらぎ軌道でもレール10節点を加振することとした。また、解析モデルの延長は100mとした。これは、モデル中央の加振による振動が十分減衰する範囲を考慮し定めた。

このような手法は、線形応答解析であることを前提としているが、軌道構造-地盤系が線形弾性体とみなせる微小ひずみレベルの振動問題に関しては妥当な手法であると考えられる。

3. 実物大軌道模型加振試験による解析モデルの検証

解析モデル検証のために、鉄道総研構内に実物大の試験軌道を構築し、起振機を用いた定点加振試験を行った。

3.1 加振試験の概要

表1に軌道構造、図3に試験軌道、図4に起振機の設置状況、図5に測点配置状況をそれぞれ示す。バラスト・ラダー軌道および横まくらぎ軌道に対して正弦波加振(100Hzまで2.5Hzピッチ)を行った。

3.2 解析に用いた物性値

表2に解析に用いた材料物性値を示す。ラダーマクラギ、横まくらぎおよびレールは一般的な値を用いたため省略する。地盤物性値はボーリング調査の結果、バラストの変形係数は既往の文献⁵⁾を参考にしたが、パラメータ解析を行い、実測結果と整合するように値を調整した。

3.3 解析結果

図6および図7にそれぞれの軌道における測定点G1(加振点直下地盤上)、測定点G3(6.25m離れ)および測定点G4(12.5m離れ)における解析結果と実測結果の比較をそれぞれ示す。図6および図7には、軌道構造を含む線路方向の断面をモデル化した擬似的な三次元FEM

表1 軌道構造の概要

| 軌道構造 | まくらぎ数 | レール | 締結装置 |
|----------|--------|------|---------|
| バラスト・ラダー | 3連 | 60kg | タイプレート式 |
| PC横まくらぎ | 3T×28本 | 60kg | 102形 |



図3 試験軌道（ラダー）



図4 起振機

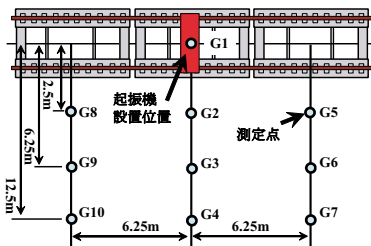


図5 測定点配置

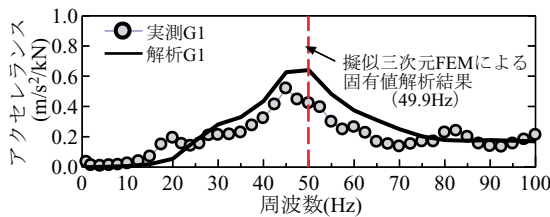


図6 ラダー軌道における実測結果と解析結果の比較

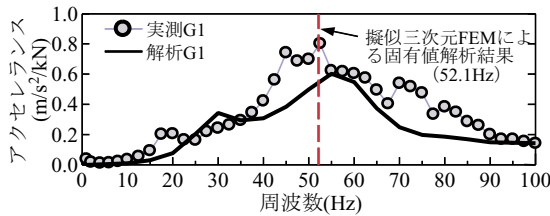


図7 横まくらぎ軌道における実測結果と解析結果の比較

モデル⁶⁾によって求めた鉛直1次固有振動数を合わせて示す。

両軌道とも振動加速度レベルのピーク値とピーク周波数が実測結果と解析結果で概ね一致していることがわかる。ここで、測定点G1では、50Hz付近で応答にピークが見られる。これは、軌道構造全体が表層地盤上で一体となって振動する鉛直1次固有振動モードに起因するものと考えられる。このピーク周波数の妥当性の検証のために、擬似的な三次元モデルを構築し、固有値解析を行った結果、該当する振動モードはラダー軌道で49.9Hz、横まくらぎ軌道で52.1Hzであった。測定点G3およびG4における50～60Hzのピークは、若干高周波側に移動しているが、この軌道構造全体の1次振動モードの影響を受けたピークであると考えられる。また、測定点G3およびG4では、30Hz付近においてもピークが

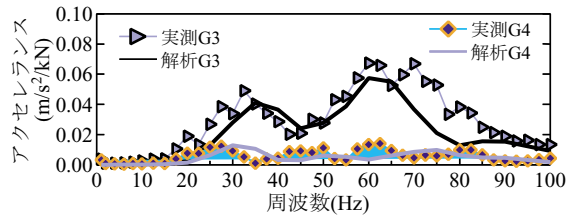
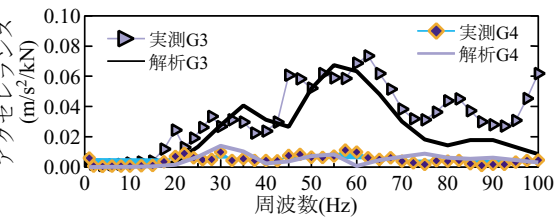
表2 各種材料物性値

| (a) 表層地盤 | | | |
|---------------------|-------------|--------------------------------------|----------------|
| 層種別 | V_s (m/s) | 単位体積重量 γ (kN/m ³) | 減衰定数 ξ (%) |
| ローム GL～-1.6m | 140 | 15 | 表(b) |
| 砂礫/ローム -1.6～2.2m | 280 | 17 | 5 |
| 砂礫 2.2～13m | 400 | 19 | 2 |
| 基盤 | 400 | 19 | 2 |

| (b) ローム層における減衰定数 | | | |
|------------------|-------|-------|--------|
| 減衰定数 ξ (%) | | | |
| ～25Hz | ～50Hz | ～75Hz | ～100Hz |
| 4 | 5 | 5 | 6 |

| (c) 軌道パッド | | | | |
|---------------------|----------------|-------|-------|--------|
| 鉛直ばね定数 K_p (MN/m) | 減衰定数 ξ (%) | | | |
| | ～25Hz | ～50Hz | ～75Hz | ～100Hz |
| 60 | 0.5 | 1.5 | 2.5 | 3.5 |

| (d) バラスト | | | | |
|-------------------------------|----------------|-------|-------|--------|
| 変形係数 E (kN/m ²) | 減衰定数 ξ (%) | | | |
| | ～25Hz | ～50Hz | ～75Hz | ～100Hz |
| 30000 | 5 | 10 | 20 | 20 |



見られるが、これは過去に同サイトで行われた試験においても観測されており、試験サイトの地盤の伝達特性に起因するピークであると考えられる⁷⁾。

本試験は定点加振試験であり、移動荷重による荷重は実施していないが、本解析モデルにより試験サイトの伝達特性を概ね再現できたと考える。

4. 数値解析による地盤振動低減効果の検討

高速列車走行時におけるバラスト・ラダー軌道の地盤振動低減効果を把握するために各種パラメータに着目して数値解析を行った。

4.1 検討方法

表3に解析パラメータを示す。各種材料物性値は3章

特集：鉄道力学

の定点加振試験の値を用いたが、地盤の減衰定数については一律5%とした。また、表4に3章と同様のモデルによる固有値解析によって求めた検討対象地盤の鉛直1次固有振動数を示す。

解析結果の評価方法は、軌道中心から12.5m地点の地盤上で得られた振動加速度の時刻歴データをレベル変換し、1/3オクターブバンドごとに、JISC1510:1995「振動レベル計」の鉛直方向の振動に対する人体感覚特性で補正した振動加速度レベル（以下、補正振動加速度レベル）で行った。以下、列車速度270km/h、360km/hを中心に検討を行う。

4.2 列車荷重

図8に列車荷重の概要、図9に列車荷重の波形形状および周波数成分を示す。列車荷重の振幅は、新幹線荷重における車両長25mの軸配置とした⁸⁾。レールの凹凸は考慮しておらず、編成両数は6両とした。図9の周波数成分を見ると、横山ら⁹⁾、吉岡ら¹⁰⁾が提案した車軸の繰返し効果による卓越周波数が現れていることがわかる。

ここで、連行移動荷重列による加振周波数は、式(2)で表される。

$$f_i = v/L_{vi} \tag{2}$$

ここに、 f_i は荷重群*i*による加振周波数、 v は列車速度、 L_{vi} は列車編成における荷重群*i*の間隔である。最も基本的な加振周波数は連結器を挟む4軸が一つの荷重群となり加振するものである。この場合、 L_{vi} は25mであり、速度270km/h(75m/s)における加振周波数は、3.0Hzとなる。列車荷重の周波数成分はこの3.0Hzの整数倍でピークを生じている。3.0Hzごとのピークの大きさは周波数ごとに異なるが、これはその他の荷重群の加振周波数およびその整数倍との重ね合わせにより定まる。台車内の2軸が一つの荷重群となり加振する周波数成分は、2種類の台車中心間隔17.5mおよび7.5mからそれぞれ4.3Hzおよび10.0Hzと求まる。また、各輪軸が一つの荷重群となり加振する周波数成分は、軸距2.5mより30.0Hzと求まる。これらにより、例えば加振周波数30.0Hzは、上記加振周波数の整数倍がすべて重なった場合であると説明できる。

4.3 検討結果

地盤のせん断波速度（以下、 V_s ）、表層地盤の層厚および列車速度が振動レベルに与える影響について、パラメータ解析の結果を以下に示す。なお、地盤振動は、実体波（P波やS波）および表面波（Rayleigh波やLove波）の影響が重なり合っ生じるため、その振動特性を単純化して考察することは容易ではないが、ここでは、表4に示した地盤の鉛直1次固有振動数、すなわち加振点直下の鉛直振動の増幅特性や図9に示した加振周波数の影響を中心に考察する。

表3 解析パラメータ

| パラメータ | 種別または設定値 |
|-----------------------|----------------------------------|
| 軌道構造 | バラスト・ラダー軌道 横まくらぎ軌道 |
| 地盤のせん断波速度 V_s (m/s) | 80, 160, 240 (深さ方向に物性値は一定とする) |
| 表層地盤の層厚 (m) | 10, 30 |
| 列車速度 (km/h) | (210), 270, 360 |

表4 擬似三次元FEMによる固有値解析結果

| 地盤のせん断波速度 V_s (m/s) | 表層地盤の層厚 (m) | 鉛直1次固有振動数 (Hz) | |
|-----------------------|-------------|----------------|-------|
| | | ラダー | 横まくらぎ |
| 80 | 10 | 9.8 | 9.7 |
| 80 | 30 | 5.0 | 4.9 |
| 160 | 10 | 18.8 | 18.7 |
| 240 | 10 | 27.9 | 27.8 |

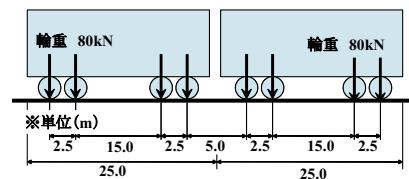


図8 列車荷重の概要

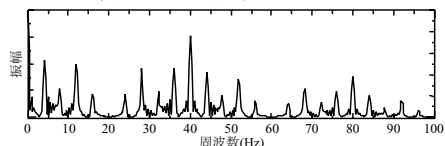
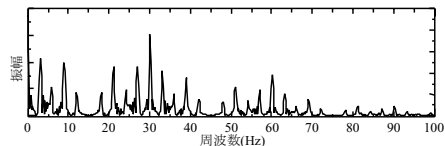
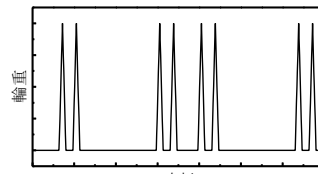


図9 列車荷重の時刻歴波形と周波数成分

4.3.1 地盤のせん断波速度の影響

図10に、地盤の層厚10m、列車速度270km/hで V_s を変化させたときの振動レベルと1/3オクターブバンド分析結果を示す。地盤が軟弱で V_s が小さいほど振動レベルが大きくなる。また、8~10Hzに大きなピークが見られるが、これは、図9(b)に示す加振周波数8.9Hzと表4に示す地盤の鉛直1次固有振動数9.8Hz(ラダー軌道)および9.7Hz(横まくらぎ軌道)が近接しているため共振現象が生じていると考えられる。4Hz以下のバラスト・ラダー軌道のピーク

V_s が80m/sの場合、バラスト・ラダー軌道は、横まくらぎ軌道に比べ振動レベルが2.4dB低減された。これは、8Hz~16Hzの帯域における振動低減効果の影響である。また、8~10Hzに大きなピークが見られるが、これは、図9(b)に示す加振周波数8.9Hzと表4に示す地盤の鉛直1次固有振動数9.8Hz(ラダー軌道)および9.7Hz(横まくらぎ軌道)が近接しているため共振現象が生じていると考えられる。4Hz以下のバラスト・ラダー軌道のピーク

クは、加振周波数3.0Hzの影響、30Hz付近のピークは加振周波数30.0Hzの影響と考えられる。

V_s が160m/sの場合、バラスト・ラダー軌道は、横まくらぎ軌道に比べ振動レベルが4.3dB増加した。これは、20Hz～50Hzの帯域での増加の影響である。また、8Hz付近のピークは図9(b)に示す加振周波数8.9Hzの影響と考えられる。20Hz付近のピークは、地盤の鉛直1次固有振動数18.8Hz(ラダー軌道)および18.7Hz(横まくらぎ軌道)の影響および加振周波数21.1Hzの影響と考えられ、30Hz付近のピークは加振周波数30.0Hzの影響と考えられる。

V_s が240m/sの場合、バラスト・ラダー軌道は、横まくらぎ軌道に比べ振動レベルが0.6dB低減された。これは、20Hz～25Hzの帯域での振動低減効果の影響である。また、その他の二つの地盤条件のような低周波数側のピークがほとんど見られず、20Hz付近に図9(b)に示す加振周波数21.1Hzの影響によるピークが見られる。

4.3.2 表層地盤の層厚の影響

図11に、列車速度270km/h、 V_s が80m/sで表層地盤の層厚を変化させたときの振動レベルと1/3オクターブバンド分析結果を示す。層厚が増加するとバラスト・ラダー軌道では4Hz以下、横まくらぎ軌道では8Hz以下の帯域が増加した。これは、図9(b)に示す加振周波数3.0Hzの影響と、地盤の鉛直1次固有振動数が層厚30mでは5.0Hz(ラダー軌道)および4.9Hz(横まくらぎ軌道)で、層厚10mと比べて近接したことに起因すると考えられる。

地盤の鉛直1次固有振動数は、層厚10mで9.8Hz(ラダー軌道)および9.7Hz(横まくらぎ軌道)、層厚30mで5.0Hz(ラダー軌道)および4.9Hz(横まくらぎ軌道)とそれぞれ変化しているが、振動レベルの支配的要因となる10Hzの帯域を着目すると、層厚の増加によってバラスト・ラダー軌道で0.7dB低下、横まくらぎ軌道で1.3dB低下で、それほど大きな変化は見られず、層厚の違いによる振動レベルへの影響はほとんど見られなかった。この結果から、本地盤条件における8～10Hz付近のピークは、4章3.1で述べた地盤の固有振動数と加振周波数が近接したことによる共振応答の影響よりも、加振周波数8.9Hzの影響の方が支配的であったと考えられる。

4.3.3 列車速度の影響

図12に、地盤の層厚10mで、地盤条件ごとに列車速度を変化させたときの振動レベルと1/3オクターブバンド分析結果を示す。図9(b)および(c)に示したように列車速度の増加にともない加振周波数が高周波数側にシフトするため、補正振動加速度レベルのピークが高周波数側に移動した。

図12(a)に、 V_s が80m/sにおける結果を示す。バラスト・ラダー軌道で、6.3Hz以下の周波数成分が増加した。しかし、バラスト・ラダー軌道は、横まくらぎに比べ振動レベルが列車速度270km/hでは2.4dB、360km/hでは0.7dB低減された。これは、それぞれ8Hz～16Hz、12.5Hz

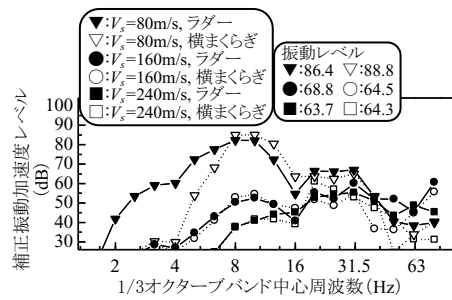


図10 地盤のせん断波速度 V_s の影響 (列車速度 270km/h)

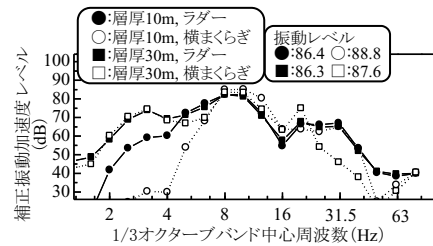
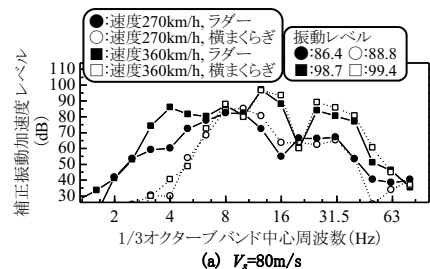
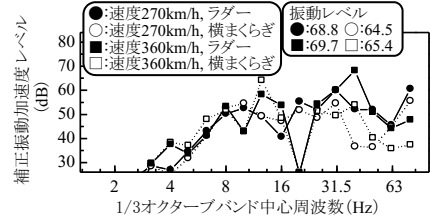


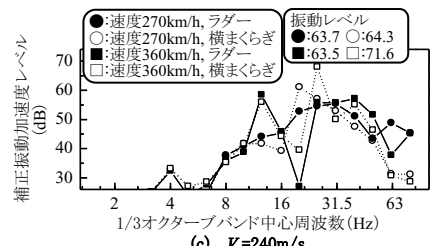
図11 地盤層厚の影響 (列車速度 270km/h, $V_s=80m/s$)



(a) $V_s=80m/s$



(b) $V_s=160m/s$



(c) $V_s=240m/s$

図12 列車速度の影響 (地盤層厚 10m)

～40Hzの帯域での振動低減効果の影響である。図12(b)に、 V_s が160m/sにおける結果を示す。バラスト・ラダー軌道では、横まくらぎに比べ振動レベルが列車速度270km/hでは4.3dB、360km/hについても4.3dB増加した。これは、それぞれ20Hz～50Hzの帯域での増加の影響である。図12(c)に、 V_s が240m/sにおける結果を示す。バラスト・ラダー軌道は、横まくらぎに比べ振動レベルが列車速度270km/hでは0.7dB、360km/hで8.1dB低減された。これは、両列車速度において20Hz～25Hzの帯

特集：鉄道力学

域での振動低減効果の影響である。

4.3.4 総合評価

図13に列車速度と振動レベルの関係を示す。地盤条件の中で最も軟弱な V_s が80m/sでは、地盤振動の速度依存性が大きく、既往の研究成果とも傾向が一致している⁹⁾。また、 V_s が80m/sではすべての速度域でバラスト・ラダー軌道で振動低減効果が見られる。

図14に、列車が横まくらぎ軌道を走行したときの地盤振動のピーク周波数と横まくらぎ軌道とバラスト・ラダー軌道の振動レベル差の関係を示す。同図より、横まくらぎ軌道で8～20Hz付近にピークがあるような地盤条件において、バラスト・ラダー軌道で振動低減効果があることがわかる。

これまで、軟弱地盤ではもともと軌道支持ばね定数が小さいため、軌道での振動対策として広く行われている軌道の低ばね化による手法では、振動低減効果が得にくいと考えられていた。今回の解析結果より、このような軟弱地盤においてバラスト・ラダー軌道は、横まくらぎ軌道に比べて振動レベルが低減されており、軟弱地盤での振動対策軌道として期待できると考えられる。

5. まとめ

構築した解析モデルについて、モデル検証およびパラメータ解析を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 試験軌道の加振試験での実測記録によって解析モデルを検証し、試験サイトの伝達特性を概ね再現できる解析モデルを構築した。
- (2) 地盤のせん断波速度 V_s により、バラスト・ラダー軌道の地盤振動低減効果の得られる周波数帯が異なることがわかった。列車が横まくらぎを通過したときの地盤振動のピーク周波数に着目すると8～20Hz付近にピークがある地盤条件で、バラスト・ラダー軌道に振動低減効果があることがわかった。また、そのような地盤条件は、地盤のせん断波速度 V_s に着目すると80m/sのような軟弱地盤となっており、従来の振動対策方法では低減効果が得にくいと考えられている軟弱地盤において、バラスト・ラダー軌道は振動低減効果を期待できることがわかった。
- (3) 地盤特性により振動レベルの速度依存性が異なり、軟弱地盤ほど速度依存性が大きいことがわかった。

今後は、車両と構造物の動的相互作用解析プログラムDIASTARS IIを用いて、車両と軌道の動的相互作用、車輪およびレール凹凸を考慮した軌道加振力モデルを構築し、解析精度を向上させるとともに、地盤のせん断波速度、地盤振動のピーク周波数および列車速度などの観点から、軌道構造の違いによって振動レベル差が生じる要因に関する分析の深度化を図っていきたいと考えている。

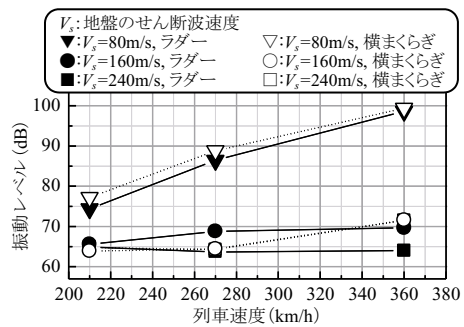


図13 振動レベルの速度依存性

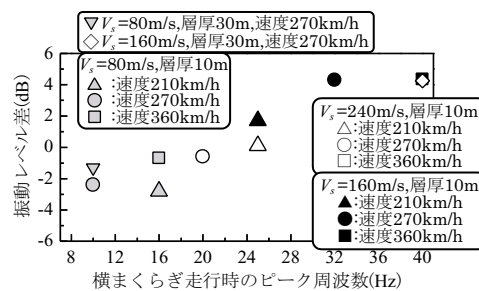


図14 バラスト・ラダー軌道と横まくらぎ軌道の振動レベル差

文献

- 1) 浅沼潔, 松本信之, 奥田広之, 涌井一: プエプロ実験線の重軌重列車走行におけるバラスト・ラダー軌道の耐久性・保守省力効果, 鉄道総研報告, Vol.16, No.2, pp.45-50, 2002
- 2) 浅沼潔, 奥田広之, 松本信之, 涌井一, 富田耕司: バラスト・ラダー軌道の座屈安定性に関する解析的検討, 鉄道総研報告, Vol.20, No.11, pp.41-46, 2006
- 3) 田治見宏, 下村幸男: 3次元薄層要素による建物-地盤系の動的解析, 日本建築学会論文報告集, 第243号, pp.41-51, 1976
- 4) 日本建築学会: 入門・建物と地盤との動的相互作用, pp.113-129, 1996
- 5) 村本勝己, 関根悦夫, 蔭関魯: 繰返し荷重を受ける道床バラストの粒度と強度・変形特性に関する検討, 第36回地盤工学研究発表会, pp.1185-1186, 2001
- 6) 大屋戸理明, 井上寛美, 曾我部正道, 松本信之, 小山弘男, 高木言芳: バラスト道床型ラダー軌道の沈下特性試験と道床圧力解析, 鉄道総研報告, Vol.10, No.9, pp.45-50, 1996
- 7) 吉岡修, 芦谷公稔: 起振機実験による鋼矢板振動遮断工の防振効果, 鉄道総研報告, Vol.4, No.8, pp.51-58, 1990
- 8) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限, pp.22-26, 2006
- 9) 横山秀史, 芦谷公稔, 岩田直泰: 新幹線高速走行時の地盤振動特性と速度依存性評価法, 鉄道総研報告, Vol.20, No.1, pp.23-28, 2006
- 10) 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, pp.299-315, 1995