

起振源の種類を考慮した鉄道振動の数値シミュレーション

野寄 真徳* 横山 秀史*

Numerical Simulation of Train-induced Vibration in Consideration of Types of Excitation Forces

Masanori NOYORI Hidefumi YOKOYAMA

Vibration caused by the running trains sometimes raises environmental issues. Train-induced vibration is caused by moving static and dynamic axle loads. In a numerical simulation of train-induced vibration, the types of the excitation forces affect the responses of the relevant structure and the ground greatly. In this study, we evaluated the influence of the types of the excitation forces on the responses of the ground. From the numerical simulation, it was found out that in the frequency less than 31.5Hz a large part of the ground vibration caused by the moving excitation forces consists of averaged components like the moving static axle loads. On the other hand, it was found out that in the frequency more than 40Hz a large part of the ground vibration by moving excitation forces consists of varying components like dynamic axle loads. Furthermore, it was found out that there is a frequency, at which an acceleration of moving excitation forces is close to that of a point force excitation. We clarified that in that frequency the acceleration of the point force excitation can be used as a substitute for that of the moving excitation forces.

キーワード：鉄道振動，数値シミュレーション，1点起振，移動起振，起振範囲，加速度周波数応答関数

1. はじめに

列車走行に伴う沿線地盤振動（以下、鉄道振動という）のシミュレーションにおいて、起振力の与え方は結果に大きな影響を与える。例えば蒲原ほか¹⁾は、平地を対象とした鉄道振動シミュレーションの結果を用いて、列車走行を考慮した移動起振解析と全区間を同位相で起振した線起振解析では、得られる振動の大きさに差があることを示した。

神田ほか²⁾は、同じ波形の荷重が列車走行位置に見合う時間遅れを伴って走行路の各点に作用する起振力を列車同期振源、走行位置により異なる起振力を位置同期振源と定義し、それぞれの振源について移動起振解析を行って応答の傾向をまとめた。ここで、実際の鉄道振動の起振力のうち、列車同期振源の代表的な例としては、静止軸重の移動が考えられる。また、位置同期振源の代表的な例としては、軌道不整などに起因する車両の揺動が考えられる。神田ほか²⁾は解析結果より、一様な半無限地盤上を連続的に加振した場合には、列車同期振源による応答は位置同期振源による応答と比べて距離減衰が極めて大きいことや、位置同期振源による応答の距離減衰は過去の実測データの平均的な距離減衰に近いことを示した。また、一様な半無限地盤上に離散的に振動源がある場合など、列車同期振源による応答の距離減衰が著大にならない場合があることを示した。しかし、これらの結果は半無限地盤を対象に解析を行なった結果であり、軌道や構造物を介して地盤へ伝播する場合の傾向に

* 防災技術研究部 地質研究室

については明らかにされていない。

走行車両・軌道・構造物・地盤をモデル化したシミュレーションにおいて、これらの起振力の特性や応答の大小関係が把握できれば、現象解明や新たな振動低減工法の提案につながる。そこで、本報告では、鉄道総研^{例3) 4)}が提案した車両・軌道・構造物・地盤系の数値シミュレーションモデルを用いて、それぞれの起振力による地盤での応答の傾向について検討した。

2. 鉄道振動シミュレーション

鉄道総研で提案した鉄道振動シミュレーション手法^{例3) 4)}では、走行車両・軌道・構造物の連成振動解析と構造物・地盤および沿線構造物の3次元振動解析の2つに分割し、起振力の受け渡しの形で両者を連携させる

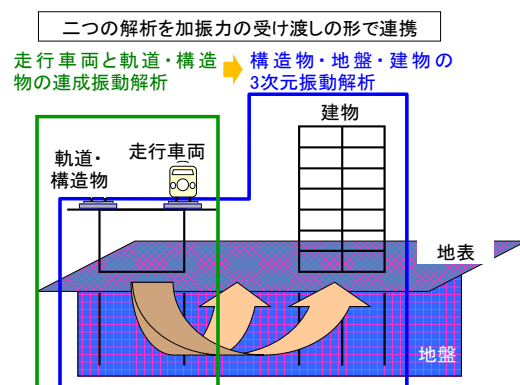


図1 シミュレーションの基本構成⁴⁾

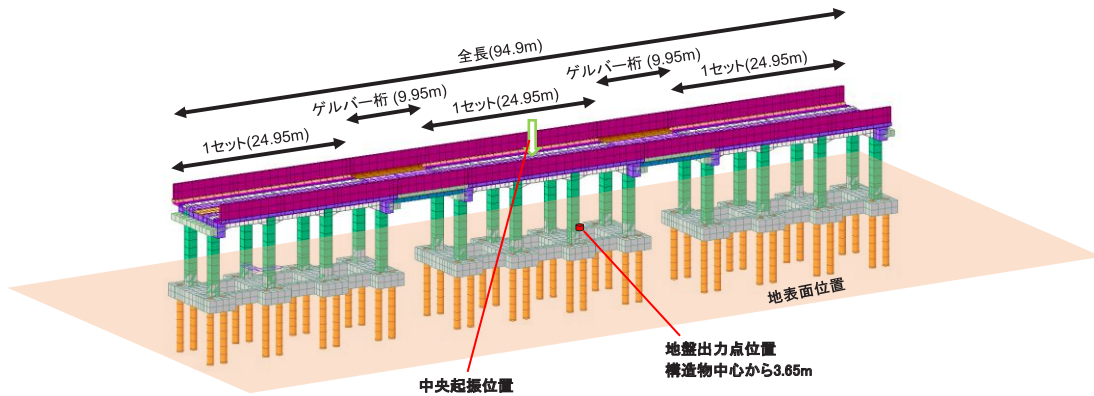


図2 構造物および地盤の3次元振動解析のモデル

ことで沿線での地盤振動を算出する(図1)。具体的な計算の流れは以下の通りである。

- (1) 走行車両・軌道・構造物の連成振動解析により、走行車両による移動起振力を計算する。
- (2) (1) で求めた起振力を構造物・地盤および沿線構造物の3次元振動解析の入力として、沿線の地盤や建物の振動を計算する。

本報告では、走行車両・軌道・構造物の2次元連成振動解析にはDALIA(㈱構造計画研究所)を、構造物および地盤の3次元振動解析にはSuperFLUSH/3DS(㈱構造計画研究所)を用いた。数値シミュレーションは、ゲルバー式ラーメン高架橋区間を対象とし、構造物および地盤の3次元振動解析ではラーメン高架橋3セット

と、それらの間のゲルバー桁2つをモデル化した(図2)。解析の上限周波数は125Hzとした。車両の諸元を表1、軌道、構造物の諸元を表2および表3、地盤の物性値を表4に示す。車両は標準的な新幹線車両の軸配置とし、解析規模の制約により8両編成とした。列車速度は260km/hとした。軌道は文献5)、構造物は標準設計図面を参考に作成した。移動起振力の計算に用いる軌道不整の波形は、新幹線スラブ区間の過去の実測等に基づいて設定した。地盤は2層の水平成層地盤とした。また、走行車両・軌道・構造物の2次元連成振動解析から構造物および地盤の3次元振動解析へ受け渡す移動起振力は、軌道スラブ-高架スラブ間の力とした。これは軌道スラブと高架スラブの間に施工されているてん充層の反力に相当するものである。

表1 車両の諸元

質量 ($\times 10^3\text{kg}$)		ばね定数 (左右計) (kN/m)		減衰係数 (左右計) (kN s/m)	
車体	31.83	車体・ 台車間	400	車体・ 台車間	50.60
台車	3.138	台車・ 車軸間	2366	台車・ 車軸間	77.61
輪軸	1.950	車輪・ レール間	1200000		

表2 軌道・構造物の諸元(質量・剛性)

	単位長さ 質量 (10^3kg/m)	曲げ剛性 ($\text{MN}\cdot\text{m}^2$)	軸剛性 (MN)	備考
レール	0.122	13.23	3317	左右レール計
軌道スラブ	1.067	46.80	14040	
高架スラブ (ラーメン部)	15.03	21770	139600	
柱 (ラーメン部)	5.808	5856	58080	2本分
桁(ゲルバー部)	16.07	13610	150000	

表3 軌道・構造物の諸元
(ばね定数・減衰係数)

	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN s/m)	備考
レール・軌道スラブ間	360000	98.41	左右レール計
軌道スラブ・高架スラブ間	4300000	259.2	

表4 地盤の物性値

地層 番号	層厚 (m)	ポアソン 比	単位体積質量 (10^3kg/m^3)	P波 速度 (m/s)	S波 速度 (m/s)	減衰定数 (%)
1	6.0	0.497	1.70	1500	110	2.0
2	200.0	0.479	1.70	1500	300	2.0

3. 起振力の種類による分離

本報告では、走行車両・軌道・構造物の2次元連成振動解析により求めた移動起振力を、平均成分とばらつき成分に分離した。ここで、起振力の平均成分とは列車走行位置によらない起振力、起振力のばらつき成分とは列車走行位置によって異なる起振力を示す。起振力の平均成分は、各起振点に入力する波形を走行開始位置からの距離と列車速度から求まる遅延時間だけずらして平均することで求めた。また、起振力のばらつき成分は、各起振点の起振力と平均成分の差を取ることで求めた。起振力の平均成分は列車位置によらず同じ波形であり、神田ほか¹⁾による列車同期振源と同等の性質を持つと考えられる。また、起振力のばらつき成分は位置同期振源による起振と同等の性質を持つと考えられる。その後、分離前の起振力(以下、全起振力という)、起振力の平均成分、起振力のばらつき成分をそれぞれ構造物および地盤の3次元振動解析に入力し沿線の地盤振動を計算した。

走行車両・軌道・構造物の2次元連成振動解析で求めた起振力(全起振力)と、これを分離した平均成分およびばらつき成分の時刻歴波形の例を図3に示す。これは、

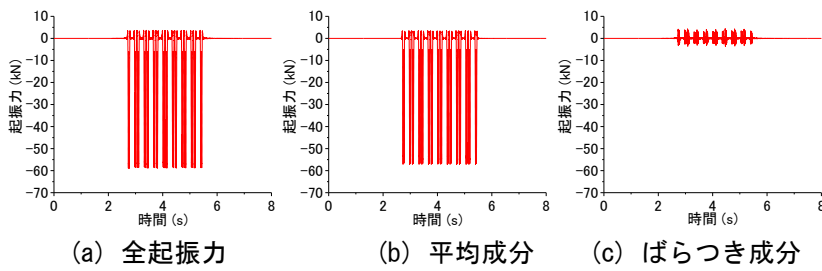


図3 起振力の時刻歴波形の例

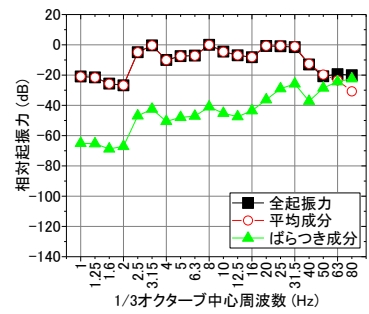


図4 起振力の1/3オクターブバンドスペクトル

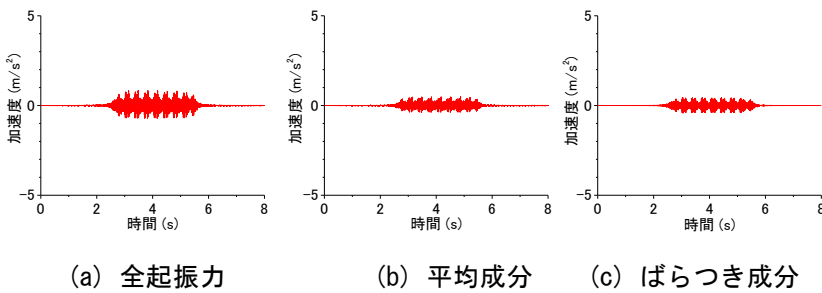


図5 1点起振時の鉛直方向の加速度応答波形

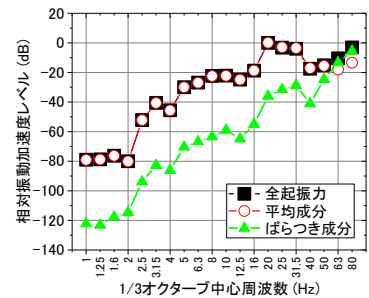


図6 1点起振時の振動加速度レベル

図2中の中央起振位置における起振力である。縦軸は起振力であり、負側が鉛直下向きを示す。まず、全起振力をみると、正側よりも負側に値が大きいことがわかる。平均成分をみると、正負側共に全起振力と同程度の値をとる。一方、ばらつき成分は、正側は全起振力と同程度の値となっているが、負側の値は小さくなっており、全起振力や平均成分とは大きく異なる波形である。また振幅の絶対値を比較すると、平均成分の値はばらつき成分の値の6倍程度となっている。

図3で示した時刻歴波形の1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベルを図4に示す。ここで、本報告内で示す起振力の1/3オクターブバンドスペクトルは、1点起振時の全起振力の最大値で正規化したものである。また、応答の振動加速度レベルは、1点起振時の全起振力による応答の最大値で正規化した。これをみると、平均成分は50Hz帯域まで全起振力とほぼ同じ値であり、63Hz帯域以上では全起振力よりも値が小さくなる。一方、ばらつき成分は12.5Hz帯域までは全起振力および平均成分より40dB以上、16～40Hz帯域では20dB以上小さい。また、63Hz帯域では平均成分の起振力に値が近くなり、80Hz帯域では平均成分の値より大きくなり全起振力に近い値となる。

4. 起振力の種類と応答の関係

4.1 1点起振時の応答

前章で求めた全起振力、平均成分およびばらつき成分

を構造物および地盤の3次元振動解析(図2)の中央起振位置に入力し、沿線の地盤振動を計算した。図3に示した起振力を図2中の中央起振位置の左右レール位置に1/2ずつ同時入力した際の、図2中の構造物中心から3.65m位置(柱面から0.3m位置)における鉛直方向の加速度応答波形を図5に示す。振幅の絶対値を比較すると、全起振力の応答と比べて平均成分の応答およびばらつき成分の応答はそれぞれ0.59倍および0.54倍の値となっている。また、平均成分の応答とばらつき成分の応答を比較すると、平均成分の応答の値はばらつき成分の値の1.08倍となっており、入力である起振力の絶対値の比とは大きく異なっている。

図5で示した加速度応答波形の1/3オクターブバンド分析による振動加速度レベルを図6に示す。これをみると、起振力の結果と同様に、平均成分の応答は50Hz帯域まで全起振力の応答とほぼ同じ値を示し、63Hz帯域以上では全起振力の応答よりも値が小さくなる。また、ばらつき成分の応答も起振力の結果と同様に、12.5Hz帯域までは全起振力の応答および平均成分の応答より34～45dB、16～40Hz帯域では20dB以上小さい。63Hz帯域では平均成分の応答の値より大きくなり全起振力の応答に近い値となる。

中央起振位置の内側レール部分を起振した際の構造物中心から3.65m位置(柱面から0.3m位置)の加速度周波数応答関数を図7に示す。これをみると、今回のモデルでは、高周波数ほど加速度周波数応答関数の値が大き

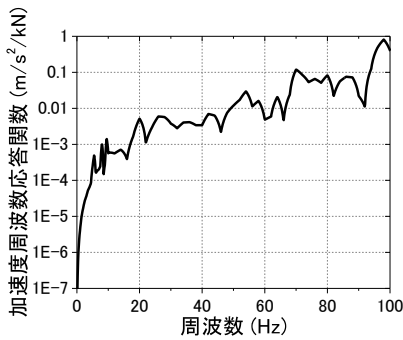


図7 中央起振位置の内側レール部分から3.65m位置までの加速度周波数応答関数

い。従って、各起振力について起振力と応答で時刻歴波形の絶対値の関係が異なった理由として、この加速度周波数応答関数の周波数特性が考えられる。

4.2 移動起振時の応答

列車走行時の振動を求めるため、全起振力、平均成分およびばらつき成分を構造物・地盤の3次元振動解析モデルのレール締結装置位置304点(レール片側で152点)に入力し、沿線の地盤振動を計算した。レール締結装置の間隔は0.625mとした。構造物中心から3.65m位置(柱面から0.3m位置)における鉛直方向の加速度応答波形を図8に示す。振幅の絶対値を比較すると、全起振力の応答と比べて平均成分およびばらつき成分の応答はそれぞれ0.66倍および0.59倍の値となっており、中央起振位置のみを起振した場合(図5)に近い結果である。また、平均成分の応答とばらつき成分の応答を比較すると、平均

成分の応答の値はばらつき成分の応答の値の1.11倍程度となっており、これも中央起振位置のみを起振した場合(図5)に近い結果である。このように、応答の全振幅で見ると、中央起振位置のみを起振した場合と移動起振の場合で、各起振成分の寄与度の変化は小さいと考えられる。

しかし、加速度応答波形の振動加速度レベル(図9)をみると、中央起振位置のみを起振した結果(図6)と比べ、移動起振結果では平均成分とばらつき成分のそれぞれの応答の大小が入れ替わる周波数帯域が低周波側へ移っていることがわかる。また、平均成分とばらつき成分の応答の値を比較すると、1~3.15Hz帯域では50~61dB、4~20Hz帯域では12~46dB程度ばらつき成分の応答の方が小さく、40Hz帯域以上では平均成分の応答よりばらつき成分の応答が大きい。以上より、1点起振と移動起振では、各周波数帯域の増幅量において平均成分とばらつき成分の応答が異なっていることがわかる。

4.3 起振範囲と応答の関係

平均成分とばらつき成分の影響をより詳細に検討するため、起振力を入力する範囲(以下、起振範囲という)を変えた際の応答を求めた。起振範囲と振動加速度レベルの関係を図10に示す。図10には、代表例として4Hz、12.5Hz、40Hz帯域の結果を示す。図10の横軸は起振範囲の長さを示し、0mは中央起振位置のみを起振した結果で、そこから両側に起振範囲を広げた。

図10より、4Hz帯域の結果では、起振範囲によらず全起振力と平均成分の応答は近い値であることがわかる。全起振力と平均成分の応答は、起振範囲が10m以

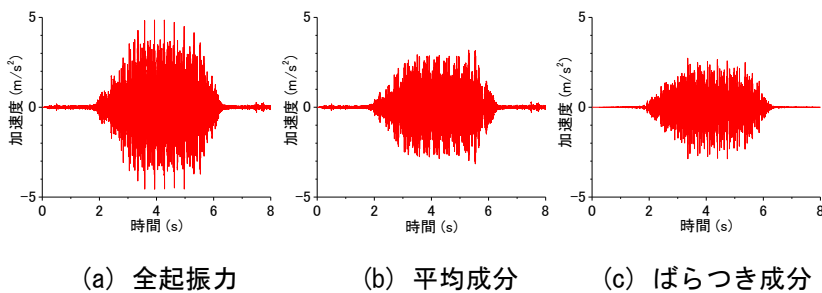


図8 移動起振時の鉛直方向の加速度応答波形

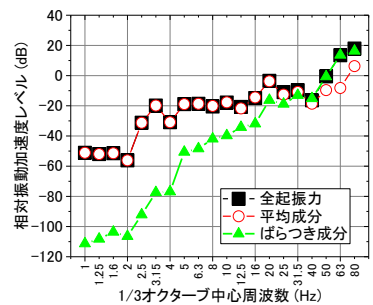


図9 移動起振時の振動加速度レベル

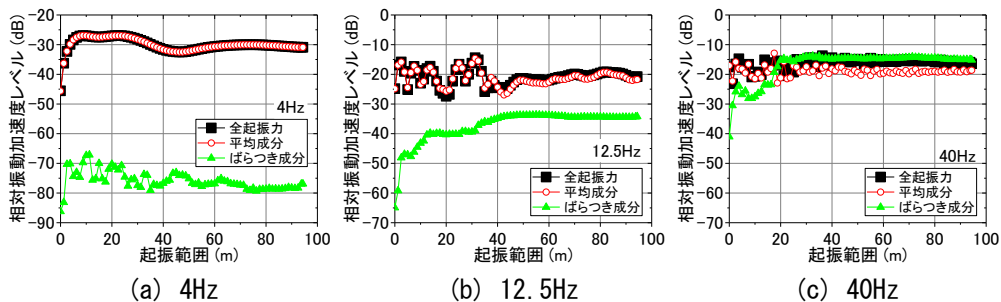


図10 起振力の種類による起振範囲と振動加速度レベルの関係

下では単調に値が増加し、10～30m付近では値があまり変化せず、30～50m付近で一度値が減少し、50mを超えるとほぼ一定値をとる。一方、ばらつき成分の応答は、起振範囲が40m以下では小刻みに細かい周期で増減を繰り返しているが、40m以上に広げると次第に値の増減幅は小さくなる。12.5Hz帯域と40Hz帯域の結果をみると、平均成分の応答は、12.5Hz帯域では起振範囲が40m以下、40Hz帯域では30m以下で小刻みに増減を繰り返す。また、起振範囲が12.5Hz帯域では40m、40Hz帯域では30mを超えると増減幅は小さくなる。一方、ばらつき成分の応答は、12.5Hz帯域では起振範囲が40m以下、40Hz帯域では20m以下で値が起振範囲の増大とともに増加し、起振範囲が40mまたは20mを超えると値はあまり増加しない。各々の成分の大小関係に着目すると、40Hz帯域では、起振範囲20m付近で平均成分の応答とばらつき成分の応答の大小が入れ替わり、それに合わせて全起振力の応答の傾向も変化する。これらの結果より、起振範囲と振動加速度レベルの関係は平均成分とばらつき成分で異なることがわかる。また、全起振力の応答は平均成分とばらつき成分の応答の和であるため、値が大きい起振力の応答と全起振力の応答の値が近くなる。

以上より、前節で示した鉄道振動シミュレーションにおける1点起振と移動起振の応答の傾向の違いは、この起振力の種類による起振範囲と振動加速度レベルの関係の違いによるものと考えられる。吉岡ほか⁶⁾は、一様な半無限地盤上を連続的に加振した場合に、列車同期振源による応答が位置同期振源による応答と比べて距離減衰が極めて大きい理由として、列車同期振源は各起振点からの振動の位相がうまく一致し、互いに相殺するためと考察している。これを参考とすれば、今回のシミュレーションにおいて、起振力の種類により起振範囲と振動加速度レベルの関係に違いが現れる理由は、起振力の位相の関係が一因と考えられる。

5. 加速度周波数応答関数に着目した起振力の種類と応答の関係

前章では、起振力の種類と応答の関係、1点起振時の応答と移動起振時の応答の関係について検討した。その結果、起振力の種類によって起振範囲と振動加速度レベルの関係が異なるため、中央起振位置のみを起振した場合と、起振範囲を広げ移動起振を行った場合で、平均成分とばらつき成分の振動加速度レベルの関係が異なることがわかった。

本章では、加速度周波数応答関数に着目し、中央起振位置のみを起振した際の加速度周波数応答関数と移動起振時の見かけ上の加速度周波数応答関数（以下、等価加速度周波数応答関数という）を比較した。ここで、等価加速度周波数応答関数は、起振力の算術平均値で応答を除いたものと定義した。

移動起振時の起振点全点の起振力を平均して図11に示す。起振力の平均は各点の起振力のレベル値を計算した後に算術平均して求めた。また、全起振力およびばらつき成分の起振力についてはエラーバーで標準偏差を併せて示す。一方、図11中の平均成分の値は、平均成分の平均値となるため定義上、図4の平均成分の値と等しい。

図11をみると、ばらつき成分の起振力の標準偏差は最大で10dB程度である。全起振力はばらつき成分の起振力の平均値が平均成分の値に近づく40Hz帯域以上の範囲で標準偏差が大きい。また、63Hz帯域で起振力の平均成分とばらつき成分の平均の値が近くなり、80Hz帯域でばらつき成分の平均の値が平均成分の値より大きくなる。これは、4.1節で示した中央起振位置の起振力(図4)で確認した傾向と同様であり、今回のモデルにおいては、多くの起振位置で確認できる傾向と考えられる。

移動起振時の構造物中心から3.65m位置（柱面から0.3m位置）での等価加速度周波数応答関数を図12に示

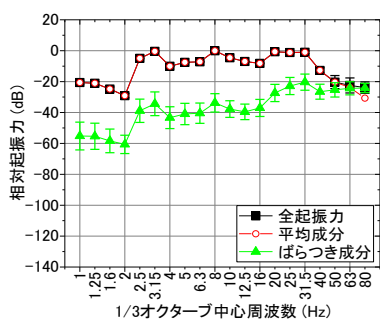


図11 移動起振時の起振点全点の起振力の平均値および標準偏差

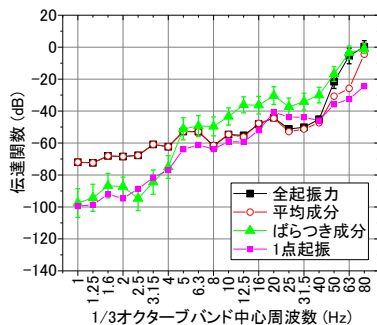


図12 移動起振時の等価加速度周波数応答関数と1点起振時の加速度周波数応答関数

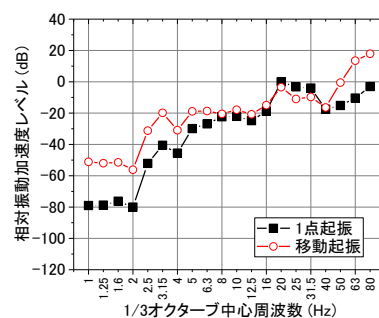


図13 全起振力入力による1点起振時の応答と移動起振時の応答

す。ここで、等価加速度周波数応答関数は、評価点の応答の振動加速度レベルと起振力のレベル値の平均(図11)の差として求めた。また、図12には起振力の標準偏差に対応した等価加速度周波数応答関数の変動幅を併記した。更に、比較のため中央起振位置のみを起振した際の加速度周波数応答関数を併せて示す。

図12において平均成分とばらつき成分の各々の等価加速度周波数応答関数を比較すると、1-4Hz帯域では平均成分の方が値が大きく、5-80Hz帯域ではばらつき成分の方が値が大きい。また、1-4Hz帯域ではばらつき成分と1点起振時の値が近く、8-20Hz帯域では平均成分および全起振力と1点起振時の値が近い。つまり、1-4Hz帯域では、移動起振時のばらつき成分の振動伝播特性を1点起振時の振動伝播特性でほぼ代表できる。また、8-20Hz帯域では、移動起振時の平均成分および全起振力の振動伝播特性を1点起振時の振動伝播特性でほぼ代表できる。ただし、ここで示した振動伝播特性とは、振動の振幅に関するものであり、位相についての検討は行っていない。

1点起振時の起振力(図4)および移動起振時の起振力の平均(図11)をみると、いずれも全起振力と平均成分は50Hz未満の周波数帯域においてほぼ同じ値である。平均成分は、1点起振時の起振力と移動起振時の起振力の平均が定義上等しいため、全起振力においても、50Hz未満の周波数帯域でほぼ同じ値となる。

また、1点起振時の加速度周波数応答関数または移動起振時の等価加速度周波数応答関数は、それぞれ、応答を起振力または起振力の平均で除したものである。従って、全起振力の50Hz未満の周波数帯域では、1点起振時の加速度周波数応答関数と移動起振時の等価加速度周波数応答関数の値が近ければ、1点起振時の応答の値と移動起振時の応答の値が近い。

図6に示した1点起振時の全起振力の応答と図9に示した移動起振時の全起振力の応答を併せて図13に再掲する。1点起振時の加速度周波数応答関数と移動起振時の全起振力の等価加速度周波数応答関数の値が近い8-20Hz帯域では、1点起振時の全起振力の応答と移動起振時の全起振力の応答の値が近くなっていることが確認できる。従って、今回のモデルでは、全起振力入力時には、8-20Hz帯域において移動起振時の応答を1点起振時の応答でほぼ代表できる。

以上より、今回のモデルでは、ばらつき成分は1-4Hz帯域で1点起振時の加速度周波数応答関数と移動起振時の等価加速度周波数応答関数の差が小さく、全起振力の平均と平均成分は8-20Hz帯域で1点起振時と移動起振時の差が小さいことがわかった。また、全起振力入力時には、8-20Hz帯域において移動起振時の応答を1点起

振時の応答でほぼ代表できる。これは、4章で記した通り起振力の位相の関係が一因と考えられるが、この現象の原因解明は今後の課題である。

6. まとめ

本報告では、鉄道振動シミュレーションの起振力を平均成分とばらつき成分に分割し、それぞれの特性について検討した。その結果、低周波側では全起振力の応答に対して平均成分の応答の寄与が大きく、高周波側ではばらつき成分の応答の寄与が大きいことがわかった。また、平均成分とばらつき成分で、起振範囲と振動加速度レベルの関係が異なっていることがわかった。更に、加速度周波数応答関数に着目して検討し、各起振力に1点起振時と移動起振時で差が小さい周波数帯があり、差が小さい周波数では、移動起振時の振動伝播特性を1点起振時の振動伝播特性でほぼ代表できることがわかった。また、1点起振時と移動起振時で全起振力の加速度周波数応答関数の差が小さい周波数において、全起振力の平均が平均成分の起振力の値に近ければ、移動起振時の応答を1点起振時の応答でほぼ代表できることがわかった。

これらの現象の原因は起振力の位相の関係が一因と考えられるが、この現象の原因解明や振動対策への応用は今後検討していきたい。

文献

- 1) 蒲原章裕・加藤信二郎・横山秀史・岩田裕一：平地区間における列車走行時の地盤振動シミュレーションの基礎検討，土木学会第69回年次学術講演会講演概要集(7)，Vol.69，pp.65-66，2014
- 2) 神田 仁，吉岡 修，石井 啓稔，加藤 政史，真田 佳典，松岡 俊文，三善 孝之：移動荷重による波動場のシミュレーションにおける振源モデリングについての考察，物理探査，Vol.58，No.4，pp.363-375，2005
- 3) 渡辺勉，曾我部正道，横山秀史，芦谷公稔，米澤豊司，清田三四郎：高速鉄道トンネル上の地盤振動解析，第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp371-374，2009
- 4) 横山秀史，伊積康彦，渡辺勉：3次元振動解析による地盤および建物振動の予測シミュレーション手法，鉄道総研報告，Vol.29，No.5，pp.41-46，2015
- 5) 須田征男，長門彰，徳岡研三，三浦重編：新しい線路一軌道の構造と管理一，日本鉄道施設協会，pp.336-343，1997
- 6) 吉岡 修，神田 仁，石井 啓稔，加藤 政史，真田 佳典，松岡 俊文，三善 孝之：移動荷重による波動場のシミュレーションにおける振源モデリングについての考察(そのII)，物理探査，Vol.59，No.5，pp.459-473，2006