

地盤振動予測に用いる距離減衰評価の 加振位置と基準位置の設定方法

野寄 真徳* 津野 靖士** 横山 秀史*

Setting Method of Excitation Position and Reference Position for Evaluation of Distance Attenuation
used by Ground Vibration Predictions

Masanori NOYORI Seiji TSUNO Hidefumi YOKOYAMA

This report investigates an appropriate excitation position and a reference position used for the empirical prediction method of ground vibration when train runs along the rigid-frame viaducts. As a result, it is found that the empirical prediction well reproduces the observation record related to the ground vibration by setting the excitation position at the center of footing and the reference position at a few meters away from footing. Therefore, it is suggested that the ground vibration model with the center of footing as the excitation position is a model close to the actual mechanism of the ground vibration generated during railway running.

キーワード：鉄道振動，経験的予測，加振位置，基準位置，フーチング

1. はじめに

列車走行に伴う地盤振動（以下、鉄道振動という）は、工事振動や道路交通振動などとともに環境振動に分類され、振動の大きさによっては沿線の環境問題になる場合がある。そのため、新たな路線の建設時や構造物等の大規模な改良時の環境影響評価などにおいて事前に振動予測評価が実施される。

鉄道振動の予測手法は、現地測定データを用いる手法と数値解析による手法の2種類に大別できる¹⁾。数値解析による手法は近年研究が進められているが^{例えは2) 3)}、計算量が膨大で環境影響評価などに利用するには課題があり、現地測定データを用いる手法が主に利用される。中でも帰帰式に基づく統計的予測手法^{例えは4)}や、予測箇所の地盤内距離減衰と類似箇所の測定データを組み合わせる手法（以下、経験的予測法という）がしばしば利用される^{例えは5) 6) 7)}。ここで、地盤内距離減衰には、現地で直接取得した特性、理論解による特性、数値解析による特性などを用いることが考えられ、いずれも予測に用いることができる。また、類似箇所とは車両・軌道・構造物・地盤が予測したい箇所に類似する箇所のことをいう。特に経験的予測法は、鉄道振動に影響する車両・軌道・構造物・地盤の要素のうち、最もばらつきが大きいと考えられる地盤内距離減衰に予測箇所の情報を用いるため、個別の予測箇所の状況を再現できるという利点がある。

この経験的予測法では、まず複数の類似箇所において、

* 防災技術研究部 地質研究室

** 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

構造物近傍（平地区間の場合は軌道近傍）の地盤にて鉄道振動測定を行い、地盤への入力振動を取得する。ここで、取得した入力振動の測定位置を基準位置という。次に予測箇所において、基準位置から予測位置までの地盤内距離減衰を求める。最後に、入力振動と地盤内距離減衰を組み合わせることで予測値とする手法である。

しかしこの経験的予測法には、高架橋区間の予測において、基準位置の設定が地盤内距離減衰の予測精度に大きく影響すること⁵⁾などの課題がある。地盤モデルに高架構造物などの構造物モデルを組み込んだ一体解析では精度良く予測できることから、構造物モデルの地中部が予測精度に与える影響が大きいと考えられる。しかし、一体解析には計算量が多いという課題がある。

そこで本報告では、構造物モデルを組み込まない地盤のみのモデルにおいて、高架橋区間の地盤内距離減衰を精度良く再現するための検討を行った。地盤の伝播特性は数値解析による特性を用いた。まず、一体解析において、構造物の影響を受ける地盤内距離減衰を評価した。次に、構造物モデルを組み込まずに実測の地盤内距離減衰を再現するために適切な加振位置と基準位置の検討を行った。

なお、本報告では鉄道振動予測で主に対象とされる鉛直振動について検討した⁸⁾。

2. 鉄道振動測定

複線の3径間の張り出し式ラーメン高架橋区間で鉄道振動測定を実施した。基礎は地中梁のない、長さ4mの

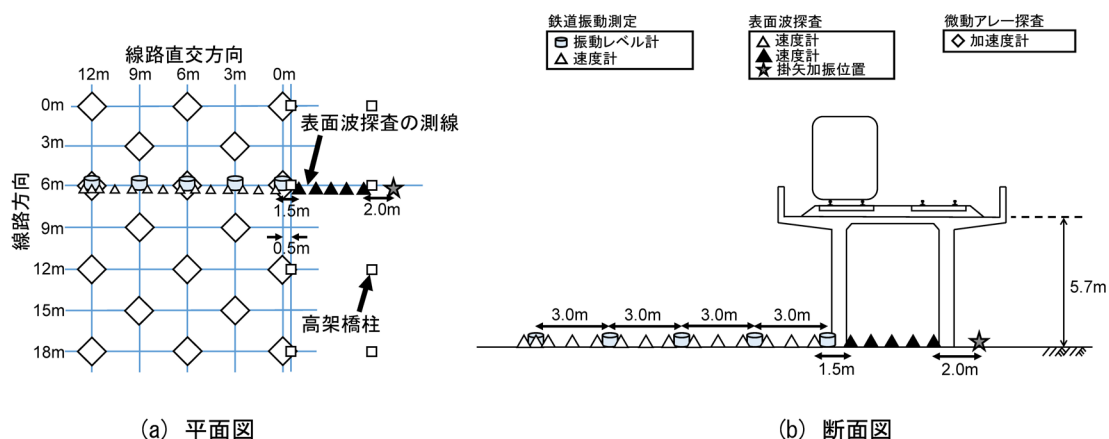


図1 鉄道振動測定，表面波探査および微動アレー探査の測定器配置

杭基礎である。また，測定箇所付近はロングレール区間であり，レール継目や分岐器等の地盤振動に影響を与えると考えられる構造はない。測定には，リオン(株)製の振動レベル計 (VM-52, VM-53, VM-55) 5 台とティアック(株)製のデータレコーダ LX-110 を使用した。振動ピックアップは，柱中心から 0.5m 位置 (柱面から 0.2m 地点) を基準に，線路直交方向に 3m 間隔で設置した (図 1)。サンプリング周波数は 3kHz とし，鉛直成分と水平 2 成分の計 3 成分を記録した。振動レベル計により測定した鉄道振動の加速度記録は測定器を展開した側の線路を走行した 5 列車の記録である。測定記録において車軸の繰り返し通過による加速度スペクトル⁹⁾ から推定される列車速度の差は測定した列車の平均速度から ± 6% 以内に収まっている。また，Geometrics 社製の地震探査装置 Geode に Geospace 社製の固有振動数 4.5Hz の速度ピックアップ GS-11D を接続して鉛直方向の鉄道振動を測定した。サンプリング周波数は 1kHz とした。

速度ピックアップで測定した鉄道振動の波形を図 2 に示す。これは測定器を展開した側の線路を走行した列車

の記録であり，測定波形を数値微分した加速度で示した。図 2(a) の波形全体をみると，柱中心からの距離が離れると振幅が小さくなること，またエンベロップが長くなることが確認できる。図 2(b) に示した切り出した 1 秒間の波形をみると，柱近傍では振幅が大きい位置と小さい位置がはっきりと分かれているが，遠方ではその位置の判別が難しい。

3. 表層地盤調査

表層地盤のレイリー波位相速度と S 波速度構造を把握するため，表面波探査^(例えば 10) と微動アレー探査^(例えば 11) を行った。表面波探査の測定には，Geometrics 社製の地震探査装置 Geode に Geospace 社製の固有振動数 4.5Hz の速度ピックアップ GS-11D を接続し，図 1 に示すように線路直交方向に設置した。柱を跨ぐ箇所および柱中心から 12.5m 地点以外は，1m 間隔で 19 台設置した。加振は掛矢により行い，オフセット距離を 2m とし，打撃 5 回分の鉛直成分の測定記録をスタッキングして分析に用いた。サンプリング周波数は 1kHz とした。微動アレー探査には，約 4.2m 間隔の格子状に(株)ミットヨ製の固有振動数 3Hz の加速度計 JEP-6A3 を 18 台設置し (図 1)，サンプリング周波数 200Hz で鉛直成分の常時微動を同時測定した。

表面波探査の測定結果の分析には FK 法 (周波数-波数スペクトル法) を用いた。FK パワースペクトルの推定には，Capon¹²⁾ の最尤法 (MLM) を用いた。微動アレー探査の測定記録の分析には空間自己相関 (SPAC) 法^{13) 14)} を用いた。

表面波探査，微動アレー探査および逆解析により推定したレイリー波の基本モードの位相速度曲線を図 3 に示す。同図より表面波探査と微動アレー探査から推定したレイリー波の基本モードの位相速度曲線が 20Hz 付近で滑らかに接続しており，2 種類の分析結果を組み合わせ

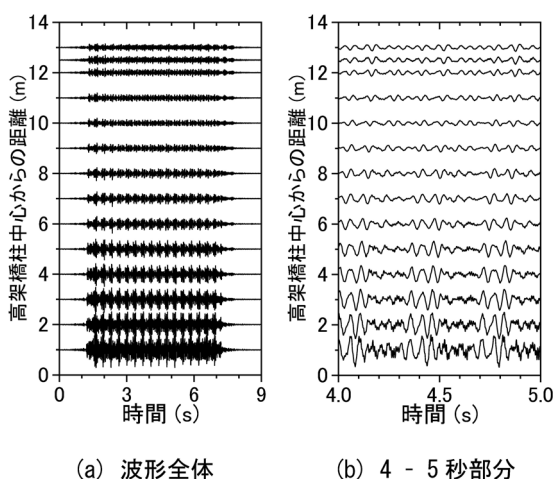


図2 鉄道振動の加速度波形

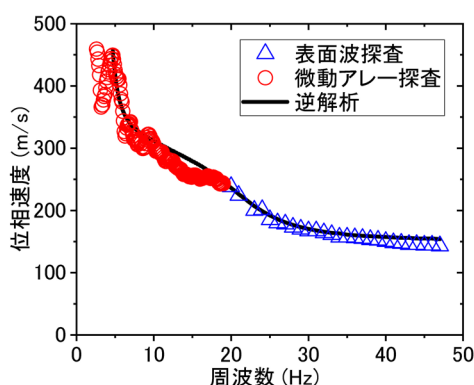


図3 表面波探査，微動アレー探査および逆解析により推定したレイリー波基本モードの位相速度

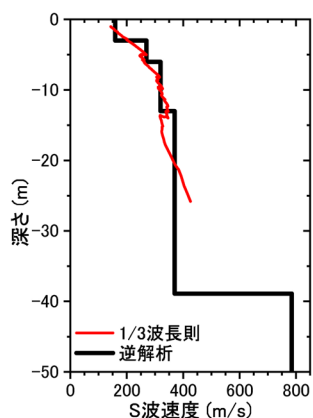


図4 1/3波長則および逆解析により推定されたS波速度構造

ることで広帯域のレイリー波位相速度が得られた。表面波探査と微動アレー探査により得たレイリー波の基本モードの位相速度を対象に、遺伝的アルゴリズム¹⁵⁾による逆解析を行い、S波速度構造を求めた。1/3波長則と逆解析により求めたS波速度構造を図4に示す。逆解析に用いた層厚とS波速度の探索範囲は、位相速度曲線に1/3波長則を適用した結果を参考に決定した。図4より測定箇所の表層地盤は、S波速度160m/s程度の層が約3m、その下位にはS波速度270m/s程度の層が約3m堆積しており、比較的堅硬な箇所であることがわかる。

4. 構造物モデルの有無による経験的予測結果の相違

4.1 モデル化概要

鉄道振動の予測手法の1つである経験的予測法は、類似箇所の測定データがある程度あれば予測を実施できる。したがって、多くの測定データが必要となる統計手法や、計算量が膨大な数値解析による予測手法に比べて、比較的容易に実施できる。しかし、経験的予測法は、高架橋区

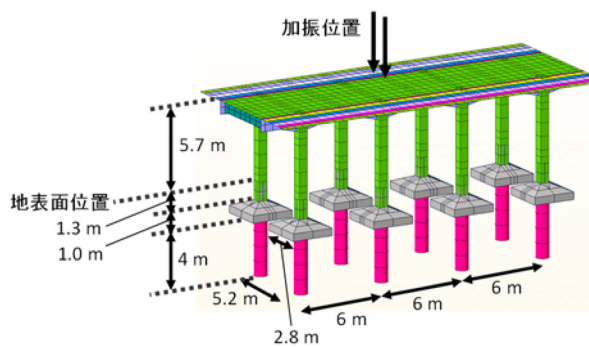


図5 3次元構造物モデル

間において、地盤のみを考慮した際に予測計算値が実測値を下回る場合がある⁵⁾。そこで本章では、経験的予測法において、構造物と地盤をモデル化した一体解析により求めた地盤内距離減衰と、地盤のみをモデル化して求めた地盤内距離減衰を用いて求めた評価結果を比較した。

本報告で用いた3次元構造物モデルを図5に示す。地盤内距離減衰の計算には(株)構造計画研究所製のSuperFLUSH/3DSを用い、構造物は3次元有限要素法により(図5)、地盤は薄層要素法によりモデル化した。構造物と地盤の物性値を表1および表2に示す。構造物は標準設計図面を、地盤は表層地盤調査の結果(図4)を参考に作成した。地盤モデルの第6層の下方には、厚さがS波速度の波長の1.5倍で物性値が第6層と同一の層を設け、さらにその下方に粘性境界を与えた。

4.2 構造物モデルの有無が鉄道振動の地盤内距離減衰に与える影響

構造物モデルの有無の影響を検討するため、以下の条件で地盤内距離減衰を算出した。まず、構造物と地盤をモデル化した一体解析の場合には、線路方向において構造物中心に位置し、線路直交方向に測線側線路の左右レール位置に相当するそれぞれ1点(図5)を同時に鉛直加振し、図1に示した振動ピックアップの設置位置間

表1 構造物モデルの諸元

ヤング係数 kN/m ²	ポアソン比	単位体積質量 10 ³ kg/m ³	減衰定数 %
2.5*10 ⁷	0.2	2.30	2.0

表2 地盤モデルの諸元

層番号	層厚	薄層厚	ポアソン比	単位体積質量	P波速度 m/s	S波速度 m/s	減衰定数 %
	m	m		10 ³ kg/m ³			
1	3.0	0.05	0.494	1.70	1500	160	5.0
2	3.0	0.05	0.483	1.80	1500	270	5.0
3	7.0	0.10	0.476	1.80	1500	320	5.0
4	13.0	0.10	0.469	1.80	1500	365	5.0
5	12.8	0.40	0.469	1.80	1500	365	5.0
6	187.2	0.40	0.409	2.00	2000	785	5.0

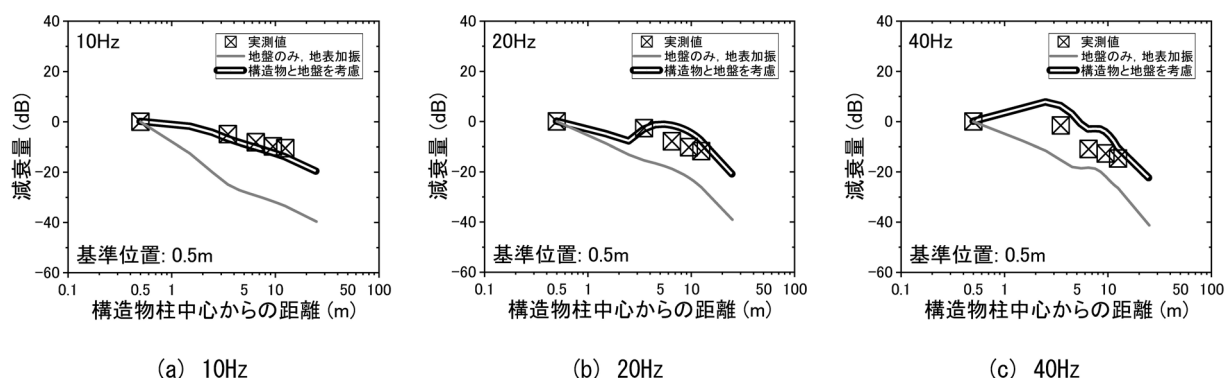


図6 実測値と数値解析による地盤内距離減衰量
(基準位置は構造物柱中心から 0.5m 位置)

での応答の比を取ることで、その2点間の地盤内距離減衰を求めた。一方、地盤のみをモデル化した場合には、振動ピックアップ直近の柱中心に対応する位置を鉛直加振し、振動ピックアップの設置位置間での応答の比を取ることで、その2点間の地盤内距離減衰を求めた。この際、加振は地表面で行った。本報告において、加振条件はいずれの場合も周波数ごとの定常加振力であり、周波数領域で応答を算出した。

10Hz, 20Hz, 40Hz における鉛直振動の減衰量を図6に示す。図6には数値解析による結果に加え、実測値を併せて示している。また、図6は柱中心から0.5m位置の値で正規化したものである。同図をみると、40Hz帯域の一部を除き、構造物と地盤をモデル化した一体解析の地盤内距離減衰は実測値を概ね再現している。一方、地盤のみをモデル化し、地表面を加振した際の地盤内距離減衰は、いずれの周波数および測定点においても、減衰量を実測値よりも過大に評価していることがわかる。

距離減衰が予測精度に与える影響を検討するため、12.5m位置における1/3オクターブバンドスペクトルの予測値を実測値と併せて図7に示す。これは、構造物と地盤をモデル化した一体解析の地盤内距離減衰と地盤のみをモデル化した際の地盤内距離減衰の各々に基づく予測値であり、柱中心から0.5m位置を基準位置として、基準位置の鉄道振動の平均dB値に各予測手法の減衰量を足し合わせることで求めた。また同図には、柱中心から0.5m, 12.5m位置の実測値と標準偏差を併せて示した。なお、本報告では、柱中心から0.5m位置における20Hz帯域の実測の平均値を0dBとして、1/3オクターブバンドスペクトルの実測記録および予測値を基準化した。構造物と地盤をモデル化した一体解析の予測値をみると、6.3Hz以上の周波数帯域では実測記録を再現していることがわかる。一方、地盤のみをモデル化した際の予測値では、2.5～4Hzの周波数帯域では実測値と近い

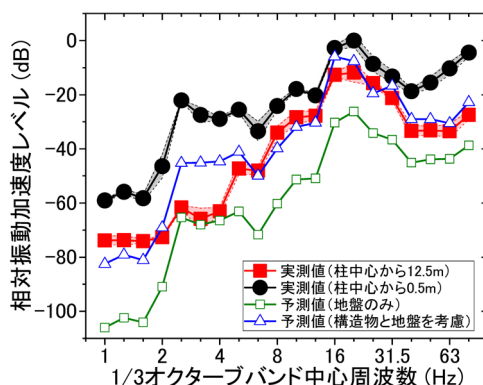


図7 1/3 オクターブバンドスペクトルの予測値と実測値の比較
(基準位置は構造物柱中心から 0.5m 位置)

値を示すが、それ以外の周波数帯域では値が小さくなっており減衰量を過大に評価している。構造物と地盤をモデル化した一体解析において2.5～5Hzの周波数帯域の誤差が大きい理由は現時点で不明であるが、振動源の移動効果による影響の可能性はある。したがって、今回の様な点加振による予測でなく、列車走行を考慮した移動加振解析^{2) 3)}による検討が必要である。

以上の検討により、鉄道振動の主要帯域である6.3Hz以上の周波数帯域に関しては、構造物と地盤をモデル化した一体解析により予測を行うことで実測値を概ね再現できるが、地盤のみをモデル化して予測を行う際には減衰量を過大に評価することがわかった。これは、構造物の地中部分から地盤へ入射される振動を、地表面1点の加振では再現しきれないためと考えられる。したがって、地盤のみをモデル化した際に地盤内距離減衰を適切に評価するためには、構造物の地中部分から地盤へ入射される振動のメカニズムを考慮した加振位置や、構造物の有無の影響をできるだけ取り除ける様な基準位置を選択する必要がある。

5. 経験的予測の加振位置と基準位置に関する検討

5.1 加振位置の深さについての検討

前章では、ラーメン高架橋区間において、経験的予測法で地盤のみをモデル化した際に地盤内距離減衰の減衰量を過大に評価することを示した。本章では、地盤のみをモデル化した際に地盤内距離減衰を適切に評価するための検討を行った。本節では加振位置の深さに着目をして検討した。

吉岡¹⁶⁾は高架橋建設時に埋め込んだ振動計や、フーチング近傍のボーリング孔に設置した振動計を用い、列車走行時の地中の振動を測定した。その結果、地中の振動はフーチング底面の深さまで同程度の振幅を保ち、それ以深では深さとともに低減することを示した。この知見を参考とすると、鉄道振動はフーチング底面の深さより浅い範囲から地盤へ振動が入射すると考えられる。また、杭およびフーチングにより構造物の荷重が支えられていることを考えると、鉛直方向の振動はその大部分が柱ではなくフーチングから地盤へ入力されると考えられる。したがって、本節では地盤のみを考慮して地盤内距離減衰を求める際の加振位置の深さをフーチング中央位置（本モデルでは地表面から -1.8m 位置）として、予測精度の検討を行った。

加振位置をフーチング中央位置として求めた 1/3 オクターブバンドスペクトルの予測値を図 8 に示す。基準位置は柱中心から 0.5m 位置である。同図に示す実測値および地表面を加振した際の結果については図 7 と同一のものである。フーチング中央位置を加振位置とした際の結果をみると、5Hz 以上の周波数帯域において、地表面を加振した際の結果より実測値に近い値が得られてお

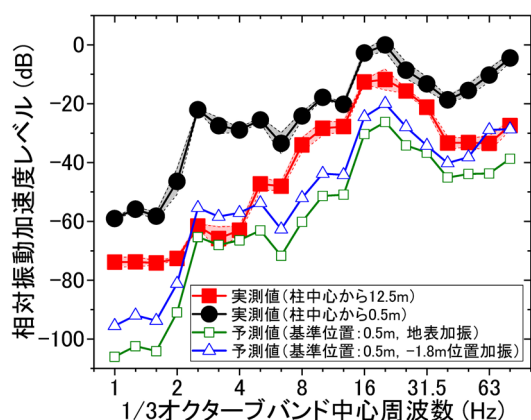


図 8 1/3 オクターブバンドスペクトルの予測値と実測値の比較
(基準位置は構造物柱中心から 0.5m 位置)

り、フーチング中央位置を加振した際の方が実際の鉄道振動のメカニズムに近いモデルであると示唆される。一方、フーチング中央位置を加振した際の結果の 5Hz 以上の周波数帯域において、未だに実測値との差が大きい周波数帯域が多い。これは、加振面として一定の大きさを持つフーチングを点で再現していることが一因と考えられる。

5.2 基準位置についての検討

フーチング上の地盤では、フーチング全体から地盤へ入射する波動の影響により、地盤のみをモデル化した点加振時とは応答が異なることが想定される。そこで本節では、フーチングの影響が小さいと考えられる位置に基準位置を設定し、地盤内距離減衰を評価した。なお、フーチングがあるのは柱中心から 1.4m 位置までの範囲である。

基準位置を柱中心から 3.5m 位置とした際の 1/3 オクターブバンドスペクトルの予測値を図 9 に示す。なお、同図に示す実測値は図 7 と同一のものである。これをみると、加振位置の深さによらず、5 ~ 40Hz の周波数帯域で実測値を概ね再現できている。

以上の検討により、柱直近位置でなく、フーチング端から離れた位置に基準位置を設置することで、経験的予測法の精度を向上させることができると考えられる。

本報告では、地盤内距離減衰と、地盤調査とそれに基づく数値解析により、予測を行った。一方、実務においては、重錘落下法⁵⁾やハンマー加振⁷⁾などで地盤を加振し、現地直接取得した特性がしばしば用いられる。このような実務調査においても、フーチング端から離れた位置に基準位置を設置することで予測精度を向上させられると考えられる。

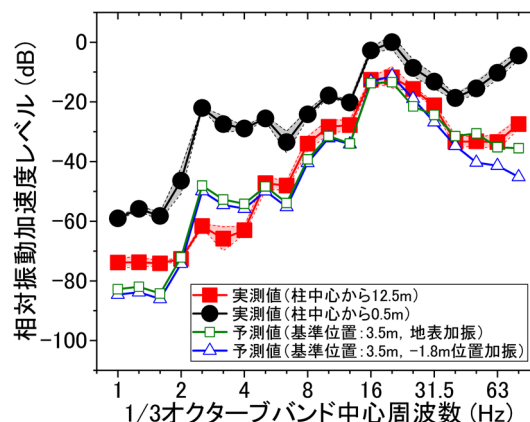


図 9 1/3 オクターブバンドスペクトルの予測値と実測値の比較
(基準位置は構造物柱中心から 3.5m 位置)

6. まとめ

本報告は、鉄道振動の予測手法のうち、予測箇所の地盤内距離減衰と類似箇所の測定データを組み合わせる手法（経験的予測法）を対象とし、予測精度向上と計算の省力化を同時に実現することを目的に検討を行った。まず、構造物モデルを組み込んだ一体解析により、地盤内距離減衰を精度よく予測できることを確認した。次に、構造物モデルを組み込まずに実測の地盤内距離減衰を再現するために適切な加振位置と基準位置の検討を行った。

本報告で得られた成果は以下の通りである。

- (1) 鉄道振動測定を行った箇所の表層地盤構造を推定した上で、構造物と地盤をモデル化した一体解析により地盤内距離減衰を評価した。その結果、6.3Hz以上の周波数帯域では実測値を再現できることがわかった。
- (2) 地盤のみをモデル化し、基準位置を柱直近として地表面を加振した際の地盤内距離減衰は、減衰量を過大に評価することがわかった。
- (3) 地盤のみをモデル化し、加振位置をフーチング中央とした方が、加振位置を地表面とするよりも、地盤内距離減衰は実測値と整合することを示した。
- (4) 地盤のみをモデル化し、基準位置をフーチングから一定距離離れた方が、基準位置を柱直近とするよりも、加振位置の深さによらず、5～40Hzの周波数帯域で実測値をより再現できることを示した。

以上の結果により、フーチング深さを加振位置とし、フーチング上から一定距離離れた位置を基準位置とすることで、実測記録の地盤伝播特性を精度良く再現でき、予測精度が向上することを明らかにした。また、地表加振の場合でも、フーチング端から離れた位置に基準位置を設置することで、予測精度を改善できることを示した。ただし、本報告の検討対象はラーメン高架橋区間のみである。したがって、今後は例えば桁式高架橋区間や盛土区間、平地区間など、今回の条件から大きく離れる箇所における手法の適用性を示すことが必要である。

文献

- 1) 一般財団法人災害科学研究所地盤環境振動研究会編著：地盤環境振動の対策技術，森北出版，2016
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 市東邦生：環境振動予測手法を用いた適用事例－地下鉄振動－，日本騒音制御工学会，研究部会技術レポート，第20号，1997
- 5) 吉岡修，永井望也，兼間強，三塚隆：落重試験等による列車走行時地盤振動の予測法，物理探査，Vol.33，No.6，pp.25-43，1980
- 6) 吉岡修：等価起振法による地盤振動の予測解析，鉄道総研報告，Vol.10，No.2，pp41-46，1996
- 7) Tsuno, S. and Iwata, Y.: A New Simplified Method to Predict Shinkansen High-Speed Train-Induced Ground Vibrations, Using the Categorized Vibration Sources and the Empirical Propagation Paths, 11th World Congress on Railway Research, 2016.
- 8) 環境庁長官勸告：環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について（勸告），環大特32号，1976
- 9) 吉岡修，芦谷公稔：軸重・軸配置が地盤振動に与える影響，鉄道総研報告，Vol.3，No.8，pp.33-40，1989
- 10) 芦谷公稔，吉岡修，横山秀史：周波数-波数スペクトルの逆解析による複数モードの位相速度推定と鉄道振動への応用，物理探査，Vol.52，No.3，pp.214-226，1999
- 11) 津野靖士，工藤一嘉：微動を用いた空間自己相関法によるS波速度構造の実務利用への評価，日本建築学会構造系論文集，Vol.596，pp.17-24，2005
- 12) Capon, J.: High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis, Proc. IEEE, Vol. 57, Issue. 8, pp.1408-1418, 1969.
- 13) Aki, K.: Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors, Bull. Earthq. Res. Inst., Vol. 35, pp.415-456, 1957.
- 14) Okada, H.: The Microtremor Survey Method, Geophysical Monograph Series, No.12, Society of Exploration Geophysicists, 2003.
- 15) Yamanaka, H. and Ishida, H.: Application of Genetic Algorithms to an Inversion of Surface-Wave Dispersion Data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86, No.2, pp.436-444, 1996.
- 16) 吉岡修：新幹線鉄道振動の発生・伝播モデルとその防振対策法への応用，鉄道総研報告特別号，No.30，1999