

多点同時測定による構造物・地盤の振動特性と 地盤振動分布との関係性の評価

野寄 真徳* 横山 秀史* 津野 靖士**

Evaluation of Vibration Characteristics of Viaducts and the Ground with Relation between Those Characteristics
and Distribution of Ground Vibration Using Simultaneous Multipoint Measurement

Masanori NOYORI Hidefumi YOKOYAMA Seiji TSUNO

Elucidating the mechanism of ground vibration is an important issue. In particular, there are many unsolved issues related to ground vibrations caused by trains, including interfere from multiple waves propagating through viaducts and the ground. Therefore, using simultaneous multipoint measurement data, we evaluated the vibration characteristics of the viaducts and the ground and the relation between those structural characteristics and distribution of ground vibration. The result of the evaluations of the vibration characteristics of the viaducts and the ground showed that variation of the vibration of the viaducts and the ground depends on the locations for measurement. It showed that the phase differences of the ground near pillars and the interference fringes of the ground vibration are related.

キーワード：地盤振動，多点同時測定，高架橋，地盤，干渉，位相差

1. はじめに

構造物や地盤等の振動の伝播メカニズムの解明や、振動性状の詳細な把握を目的として、測定対象物に設置した多数の振動計を同期させて構造物や地盤の振動測定（以下、多点同時測定）が行われることがある。

鉄道においても、高架橋近傍地盤で多点同時測定を行い地盤振動の波動伝播特性を検討した例¹⁾や、鉄筋コンクリート（以下、RC）鉄道高架橋で多点同時測定を行い構造物音に関わる振動特性を把握した例²⁾等が報告されている。これらの列車走行に伴う構造物及び地盤の振動（以下、鉄道振動）の多点同時測定の既往の事例では、鉄道構造物または地盤のいずれかに特化した測定が行われた。しかし、鉄道振動の現象解明のためには、鉄道構造物と沿線地盤の同時測定により、鉄道構造物と地盤の振動特性の相互的な関係性を含む鉄道振動の伝播性状を把握する必要がある。

鉄道振動の振動源となる列車はほぼ同一の車両が複数連結されて走行しており、加振の規則性が高い。また、列車長は仮に4両編成であっても80m程度で、通常的环境振動評価点までの距離（軌道中心から10～25m程度）や一般的な高架橋のセット長（20～30m程度）よりも十分に長く、鉄道振動の評価点に対して列車荷重は線振源に近い状態で作用すると考えられる。このため、

構造物を伝播する波動間の干渉や、構造物の複数の基礎から地盤に伝播する波動の干渉等が生じる可能性があり、構造物や地盤での振動の伝播メカニズム解明にあたっては、これらの現象を把握できるように測定する必要がある。

このような考えに基づき、鉄道構造物と地盤における鉄道振動や常時微動の多点同時測定を実施した。本稿では、多点同時測定結果を用いた構造物・地盤の振動特性およびそれら振動特性と鉄道沿線地盤における振動分布の関係性の評価結果について報告する^{3)～6)}。

2. 鉄道構造物と地盤における多点同時測定の概要³⁾

測定箇所は複線の2柱3径間の張出式RCラーメン高架橋である。軌道はバラスト軌道である。測定は、図1および図2に示す測定器配置で2回に分けて実施した。測定器は、高架橋の保守用通路と高架橋の近傍地盤に最大60点配置した。

測定パターン1（図1）では、高架橋及び柱下部近傍の地盤の振動測定として、柱上部近傍の保守用通路で8点、下り線の高架橋中央部の保守用通路で1点、高架橋の柱面から0.2mの地盤で8点に振動レベル計（リオンVM-52, VM-53, VM-55）を用い測定した。

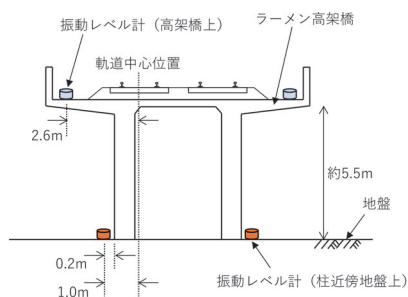
測定パターン2（図2）では、柱面より線路直交方向に0.2m離れた位置を基準線とし、線路方向に18m、線路直交方向に12mの範囲の地盤上に測定器を展開した。3mごとの各位置には、振動レベル計あるいは地震計

* 防災技術研究部 地質研究室

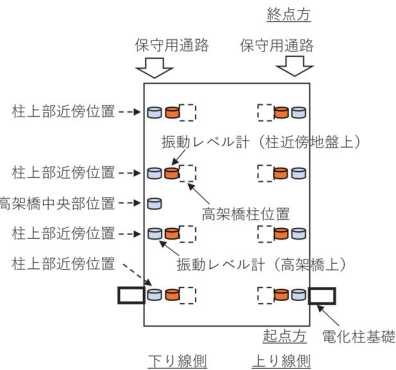
** 鉄道地震工学研究センター 地震解析研究室

(航空電子 JAE-JA3, ミットヨ JEP6A3, 白山工業 JU410)を設置した。3m グリッドの中心には地震探査装置 (Geospace GS-11D) を設置した。また、線路直交方向に 12m の地点に、振動レベル計、地震計、地震探査装置を 1 台ずつ並べて設置し、それぞれの機器の特性の違いを確認するためのリファレンス点とした。なお、振動レベル計と地震計は鉛直 1 成分と水平 2 成分の計 3 成分、地震探査装置は鉛直 1 成分を測定した。

振動レベル計と地震探査装置の測定データはそれぞれ 1 台のデータレコーダにまとめて収録し、地震計の測定データは 1 台または 2 台の地震計に対し 1 台のデータレコーダを用い収録した。時刻は、地震計の測定記録に



(a) 高架橋上と地盤の測定器配置 (立面図)



(b) 高架橋上と地盤の測定器配置 (平面図)

図 1 測定パターン 1 (高架橋と地盤の同時測定)

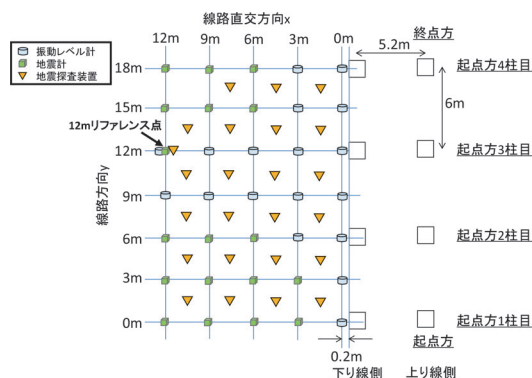


図 2 測定パターン 2 (地盤上の測定)³⁾

は GPS による絶対時刻が収録されるが、振動レベル計と地震探査装置の測定データには絶対時刻が収録されないため、リファレンス点で機器ごとの相互相関を取り、時刻を合わせた (図 3)。

3. 測定結果

3.1 構造物の振動特性

測定パターン 1 の同時測定時の、柱上部近傍の保守用通路と柱下部近傍の地盤のフーリエ振幅スペクトルを図 4 に示す。図 4 には、鉄道振動と常時微動の結果を併せて示す。ここでは、起点方から 1 柱目の下り線側の柱の上下の測定記録を用いた。使用した鉄道振動記録は下り通過列車のものである。なお、本節で示す鉄道振動のフーリエ振幅スペクトルは列車通過中の平均値である。これをみると、全周波数域で鉄道振動が常時微動よりも大きくなっていることがわかる。常時微動の結果をみると、保守用通路の結果では 6.5Hz と 18Hz が卓越しており、高架橋柱下部近傍の地盤の結果ではその周波数に明瞭なピークがみられないため、高架橋の固有振動数の可能性

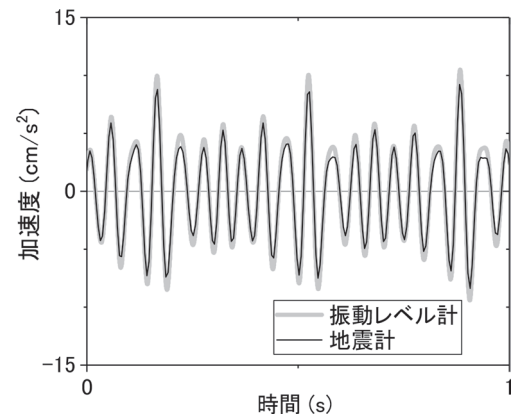


図 3 振動レベル計の記録と地震計の記録の比較³⁾ (時刻合わせ後、鉄道振動)

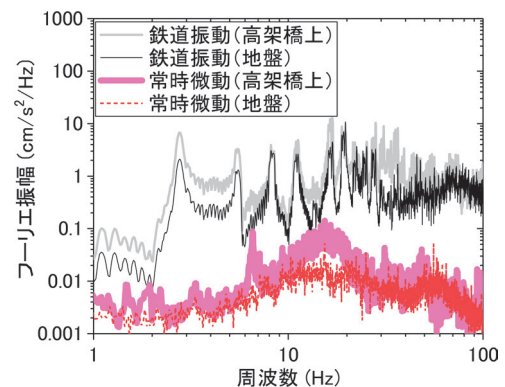


図 4 鉄道振動と常時微動のフーリエ振幅スペクトルの比較³⁾

がある。一方、鉄道振動の結果をみると、保守用通路の結果と柱下部近傍の地盤の結果の両方で車軸の繰り返し荷重に起因するスペクトル⁷⁾による複数の明瞭なピークが2Hz以上の周波数域にあり、構造物の振動特性に依存すると考えられるピークは不明瞭である。

図5に鉄道振動と常時微動の結果の構造物上下でのフーリエ振幅スペクトルの比を示す。測定記録には、図4と同一の起点方から1柱目の下り線側の柱の上下のものを用いた。スペクトル比は構造物上部（保守用通路位置）の記録を構造物下部の地盤（柱下部近傍の地盤位置）の記録で除して求めた。常時微動の結果をみると、図4で示した6.5Hzと18Hzにピークがある。鉄道振動の結果においても、6.5Hzと18Hzにピークがあるため、構造物の固有振動数である可能性が高い。一方、2Hzから6Hzの周波数帯域と30Hz以上の周波数帯域では、鉄道振動のスペクトル比が常時微動のそれより大きい。この原因は現時点で不明であるが、加振方法の違いや振動の大きさの違いの影響などが要因として考えられる。

下り線通過列車による高架橋上の振動加速度レベルの1/3オクターブバンドスペクトルを図6に示す。図6より、一部の周波数帯域を除き各測定点の振動加速度レベルの差は概ね5dB以内であるとわかる。測定点による相違が大きい帯域は8Hzおよび20Hz帯域と63～80Hz帯域で、いずれも起点側から1柱目の位置の振動が他の箇所よりも5～10dB程度小さい。同様の結果が今回対象としたいいずれの列車データにも見られたことから、測定位置に固有の要因があると考えられる。この要因としては測定点近傍の局所的な剛性の影響や、位置による加振力の変動等が考えられる。1柱目の測定点脇には、図1(b)に示すとおり電化柱があり、測定点下部には電化柱を支持するための横梁があるため、他の箇所よりも相対的に剛性が高い。一方、各柱近傍の地盤での1/3オクターブバンドスペクトル（図7）をみると、いずれの帯

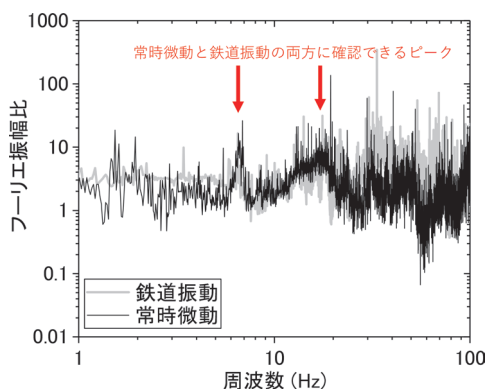


図5 鉄道振動と常時微動のフーリエ振幅スペクトル比の比較（保守用通路位置 / 柱下部近傍の地盤位置）³⁾

域も1柱目下部近傍の地盤振動は他の柱の位置と同程度以上の値であり、この帯域の加振力が1柱目近傍で顕著に小さいとは考えがたい。このことから高架橋上の振動が小さかった要因は測定位置近傍の局所的な剛性の違いの影響と考えられる。従来振動源近傍の代表点として振動測定点を選定する際には、経験的判断として電化柱基礎近傍など標準的な構造でない箇所を避ける場合が多い。図6の結果は、このような経験的な振動測定点の選定法の妥当性を改めて示すと考えられる。

次に高架橋の各柱について、測定点に近接する側の線路を列車が通過した際の構造物上下の振動加速度レベル差により、構造物上下の振動伝達特性を検討した。図1に示すとおり構造物上の測定点は高架橋の線路直交方向の端部の保守用通路に設置されており、得られた振動特性は高架橋の柱上下の振動伝達特性と線路直交方向の張出しスラブ自体の振動の影響の双方が含まれたみかけの伝達特性である。

柱下部近傍の地盤振動の振動加速度レベルと、構造物上の測定点における振動加速度レベルの差を図8に示す。図8より、構造物上下の振動加速度レベル差は、起点方から1柱目の位置を除き2～31.5Hz帯域でほぼ一様に-10dB程度である。一方、起点方1柱目は8～

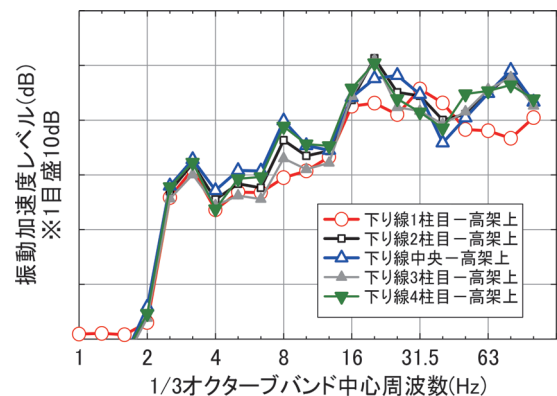


図6 振動源近傍測定点の1/3オクターブバンドスペクトル

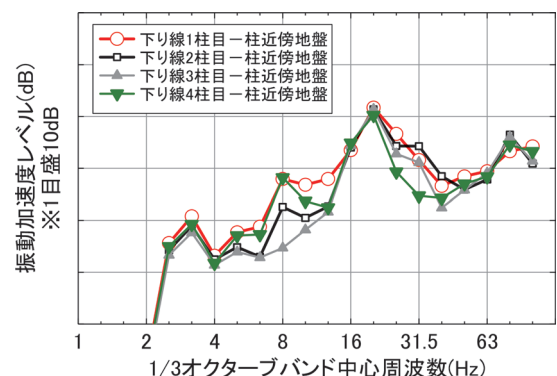


図7 柱近傍の地盤振動の振動加速度レベル

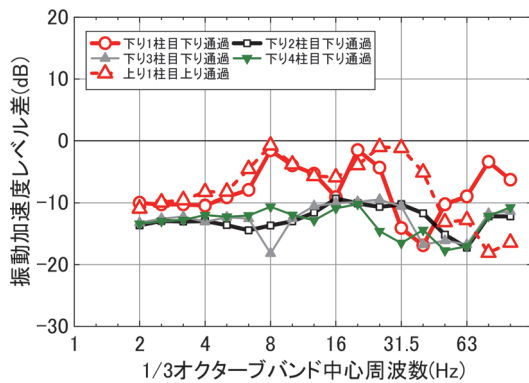


図8 各柱上下の振動加速度レベルの差（柱下部近傍の地盤位置—保守用通路位置）

25Hz 帯域の振動加速度レベル差が他の柱よりも小さく、8Hz および 20Hz では $-1.4 \sim -1.5$ dB 程度である。起点方 1 柱目について、上り列車通過時の上り線側測定点で検討したところ、下り線側と同様の傾向が確認された。

図 7 より、柱近傍の地盤振動については、8Hz と 20Hz のいずれの帯域も起点方 1 柱目と 4 柱目の振動はほぼ同程度の大きさであり、特に 20Hz 帯域については 1 柱目～4 柱目の全ての柱近傍ではほぼ同程度である。各柱の剛性等には大きな差がないことを考えると、起点側 1 柱目位置と 2～4 柱目位置の構造物上下の振動レベル差の相違は上述した構造物上の測定点近傍の局所的な剛性の違いによるみかけの差と考えられる。

3.2 地盤の振動特性

図 9 に測定パターン 2 で下り通過列車の鉄道振動の測定を行った際の最大振幅の平面分布を示す。これは、一般的に環境振動評価点位置（軌道中心から 10～25m 程度）で主要帯域となる 5～30Hz のバンドパスフィルターを測定波形に施した結果である。測定点間の値は線形補間で求めた。

この結果をみると、柱近傍で最大振幅が大きく、遠方で小さくなるという大まかな傾向はあるが、例えば線路直交方向が同じ 12m の位置でも、線路方向が 15m 付近の位置では最大振幅が大きく、6m 付近では小さい等のばらつきがある。このばらつきの要因としては、構造物の振動特性または局所的な地盤物性の影響が考えられる。

今回の測定パターン 2 の範囲では別途微動アレイ探査^{例え 8)}を実施しており、平面アレイの範囲を 6 つの小アレイに分けて測定範囲内の地盤物性のばらつきを評価している⁴⁾。その結果、6 つの小アレイにおいて表層の地盤物性にばらつきが殆ど見られなかったことから、図 9 において線路直交方向の位置が同じであっても線路方向の位置が異なる箇所でも最大振幅にばらつきがある理由は局所的な地盤物性の影響でないと考えられる。

環境振動評価点位置（軌道中心から 10～25m 程度）に該当する本測定箇所のリファレンス点（測定パターン 2（図 2））において、地盤振動が卓越していた 20Hz および 25Hz 帯域の 1/3 オクターブバンド振動加速度レベルの平面分布を図 10 に示す。この結果をみると、20Hz 帯域（図 10(a)）では多少の差はあるが、基本的に軌道からの距離が遠くなるに従ってレベル値は小さくなる。一方、25Hz 帯域（図 10(b)）では柱直近でレベル値が大きく遠方で小さいという傾向はあるが、同じ線路直交方向の位置であっても振動加速度レベルが線路方向に 10dB 程度ばらつくような複雑な分布であることがわかる。

点加振源から生じた地盤内の振動の距離減衰量の推定式として、環境振動の分野で広く使用されている式 (1) および式 (2) がある⁹⁾。

$$\Delta L = 20 \log_{10} (r/r_0)^n + 8.68 \alpha (r - r_0) \quad (1)$$

$$\alpha = \omega h / 2v_R \quad (2)$$

ここで、 ΔL は基準点から評価点までの各周波数の振動加速度レベルの距離減衰量 (dB)、 r_0 は加振点から基準点までの距離、 r は加振点から振動評価点までの距離、 n は幾何減衰係数（表面波： $n=0.5$ ）、 α は内部減衰係数、 ω は角振動数（ $=2\pi f$ ）、 h は減衰定数（0.02～0.05 程度）、 v_R はレイリー波の位相速度（ポアソン比により値は変化するが、S 波速度のおよそ 9 割程度）、 f は振動数を示す。

S 波速度が不明な場合、比較的に入手が容易な N 値からの推定式として式 (3) が提案されている¹⁰⁾。

$$v_s = 89.8 N^{0.341} \quad (3)$$

ここで、 v_s は S 波速度 (m/s)、 N は N 値を表す。

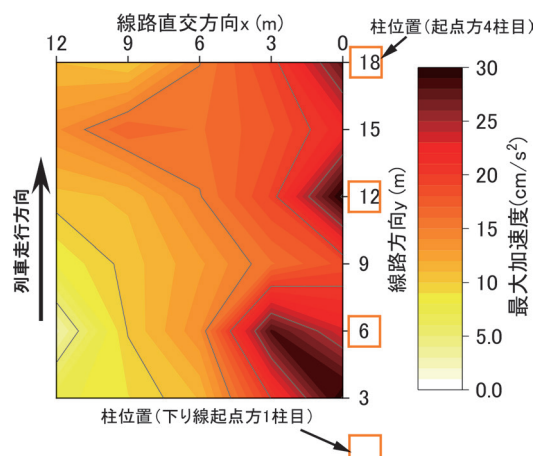


図9 最大加速度振幅分布（バンドパス：5～30Hz）

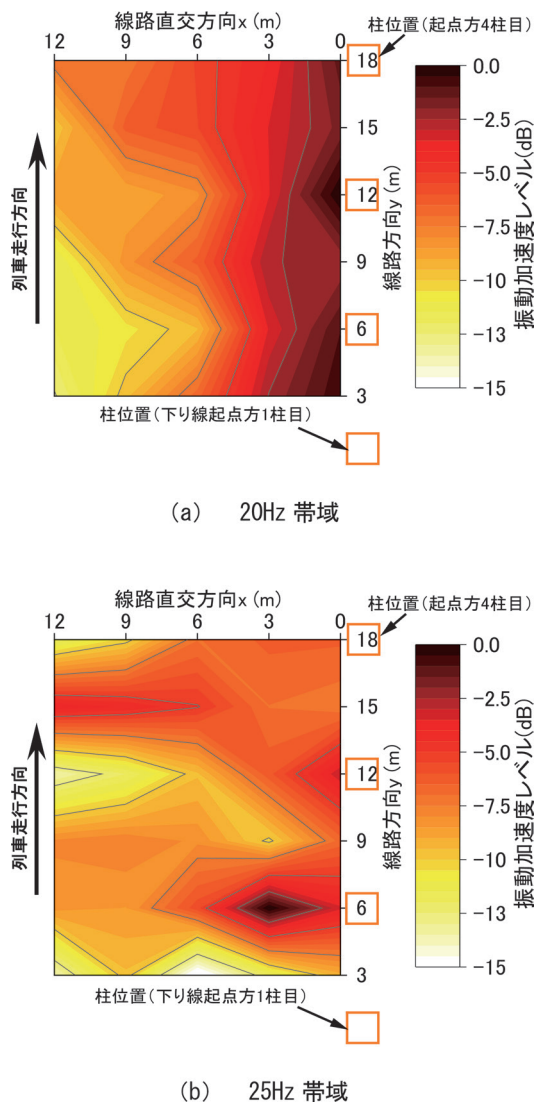


図 10 1/3 オクターブバンド振動加速度レベルの平面分布

線路方向の振動加速度レベルのばらつきが小さかった 20Hz 帯域について、対象箇所の N 値の平均値 34.2 から式 (1)、式 (2) および式 (3) を用いて求めた距離減衰量を図 11 に示す。ここで、加振点位置は 1 本の柱中心位置とし、基準点位置は線路直交方向に 3m 位置とした⁵⁾。また、図 11 には図 10(a) に示した測定記録から算出した平均値および標準偏差を併せて示す。これをみると、線路方向の振動加速度レベルのばらつきが小さければ既往の式で距離減衰量を概ね推定できることがわかる。測定記録は複数の柱から生じた振動の重ね合わせと考えられ、1 つの点加振源に対する距離減衰式が適用可能な範囲などは今後の検討が必要と考える。一方、25Hz 帯域の様に (図 10(b)) 線路方向の振動加速度レベルのばらつきが大きい場合、式 (1) で仮定されている様な 1 つの点加振源からの様な距離減衰が必ずしも成り立たないと考えられ、上記の式を用いて推定することで予測誤差

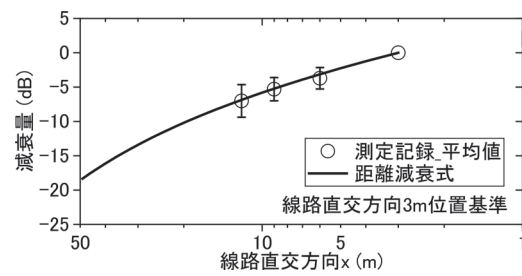


図 11 測定記録と推定式による距離減衰量の比較（エラーバーは標準偏差）

が大きくなる可能性があると考えられる。

今回の測定箇所において地盤物性には局所的なばらつきが殆ど見られなかった⁴⁾ ことから、同じ線路直交方向の位置で振動加速度レベルがばらつく原因は構造物の振動特性にあると考えられる。そこで次章では、地盤振動の平面分布と構造物の振動特性の関係性について検討を行った。地盤振動の平面分布に直接関係する構造物の振動特性としては柱同士の位相差があり、またそれを生み出す原因として構造物の振動モードがあると考えられるため、次章ではその 2 つについて検討を行った。

4. 地盤振動の平面分布と構造物の振動特性の関係性についての検討⁶⁾

1/3 オクターブバンドレベルにおいて、地盤振動が複雑な分布を示した 25Hz 帯域 (22.4~28Hz) 内で最も振幅が大きい 27Hz の柱近傍地盤位置での鉄道振動波形を例として図 12 に示す。これは中心周波数を 27Hz としたガウス関数型のフィルターにてバンドパス処理を行った下り通過列車の測定結果である。ガウス関数の σ は 0.1Hz である。

図 12 をみると、振幅に差は見られるが、起点方 1 柱目と 3 柱目および 4 柱目の位相差が小さいことが分かる。また、起点方 1 柱目、3 柱目および 4 柱目と 2 柱目は逆位相に近い状態になっている。図 10(b) では、線路直交方向の位置が 9m 以遠の範囲において、線路方向が 15m の位置で値が大きくなっている。線路方向が 15m の位置は起点方 3 柱目と 4 柱目の中央に位置しており、柱を振動源と考えれば同位相の振動源による干渉現象として説明できる。一方、線路方向が 3m の位置では値が小さくなっている位置があるが、これは逆位相の振動源による干渉現象として説明できる。したがって、図 12 に示す柱同士の位相差が沿線地盤の振動分布に影響を及ぼしていると考えられる。

次に、27Hz における下り線側列車通過時の高架スラブの振動モード形を図 13 に示す。これは高架橋上に設置した 9 箇所の測定点のデータを用いて、実験モード解

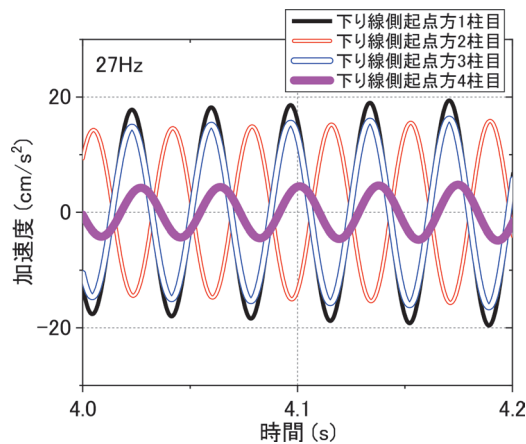


図 12 柱近傍の地盤の鉄道振動波形（27Hz を中心としたガウス関数型のバンドパスフィルター処理後）

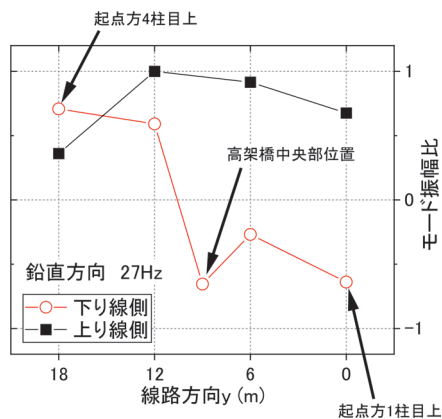


図 13 下り線側列車通過時の高架スラブの振動モード形（27Hz）

析¹¹⁾により振動モード形を求めたものである。これを見ると下り線側の測定点では起点方2柱目と3柱目は逆位相、3柱目と4柱目は同位相となっており、図12の柱近傍地盤の位相関係と対応している。一方、1柱目と2柱目は同位相となっており、柱近傍地盤の位相関係とは異なる。1柱目の測定位置下にある電化柱基礎等の影響も考えられるが、この理由は現時点で不明であるため、今後数値モデルによるモード解析等により検討する。

以上より、鉄道沿線の地盤振動の平面分布と高架橋の柱近傍地盤の振動特性が対応していることが明らかとなった。この知見より、高架橋の柱近傍地盤の測定結果と地盤物性値を用いて、各柱から入力される振動の重ね合わせにより鉄道沿線の地盤振動の平面分布を予測できる可能性があるため今後検討していきたいと考えている。

5. まとめ

本稿では、構造物を伝播する波動間の干渉や、構造物の複数の基礎から地盤に伝播する波動の干渉等を含む構

造物や地盤での振動の伝播メカニズム解明のために、鉄道構造物と地盤における鉄道振動や常時微動の多点同時測定を実施し、評価結果について報告した。

得られた結果を以下にまとめる。

- ・柱下部近傍地盤位置と保守用通路位置での振動加速度レベルの差は、電化柱基礎がある柱以外では2～31.5Hz帯域ではほぼ一様に-10dB程度となった。一方、柱下部近傍の地盤位置の振動は電化柱基礎の有無によらずほぼ同程度であった。各柱の剛性等には大きな差がないこと等を考えると、振動加速度レベルの差の違いは、測定点近傍の局所的な剛性の影響や、電化柱を支持するための横梁による剛性の差の影響と考えられる。
- ・鉄道沿線の地盤上に測定器を平面的に配置し鉄道振動測定を実施した結果、線路から等距離の位置で振動加速度レベルがばらつく周波数があることがわかった。今回の測定箇所において地盤物性には局所的なばらつきがほとんど見られなかったことから、ばらつきの原因は構造物の振動特性にあると考えられる。
- ・沿線地盤の振動の平面分布と構造物の振動特性の関係性について検討した結果、高架橋の柱同士の位相差が沿線地盤の振動分布に影響を及ぼしていると考えられる。今後は今回得られた知見を用いて、鉄道沿線の地盤振動の平面分布の予測手法の検討を行いたいと考えている。

文 献

- 1) 三塚隆，森田明，吉岡修，芦谷公稔：新幹線の高架橋近傍における地盤振動の波動特性，物理探査学会第91回学術講演会論文集，Vol.91，pp.252-256，1994
- 2) 松岡弘大，貝戸清之，渡辺勉，曾我部正道：走行列車荷重を利用したRC鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.67，No.3，pp.545-564，2011
- 3) 野寄真徳，津野靖士，横山秀史：高架橋と近傍地盤における鉄道振動の多点同時測定，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学I（2017），pp.371-372，2017
- 4) 野寄真徳，津野靖士，横山秀史：高架橋と近傍地盤における鉄道振動の多点同時測定（その2）近傍地盤の地下構造調査，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学I（2018），pp.429-430，2018
- 5) 野寄真徳，津野靖士，横山秀史：高架橋と近傍地盤における鉄道振動の多点同時測定（その3）現地測定データを用いた鉄道振動予測手法，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学I（2019），pp.457-458，2019
- 6) 津野靖士，野寄真徳，横山秀史：高架橋と近傍地盤における鉄道振動の多点同時測定（その4）鉄道振動による波動の干渉効果に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学I（2019），pp.459-460，2019

- 7) 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
- 8) 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.70, No.596, pp.17-24, 2005
- 9) 社団法人日本騒音制御工学会: 地域の環境振動, 技報堂出版, pp.106-115, 2001
- 10) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎: 日本の地盤における弾性波速度と力学的性質, 第 5 回日本工学シンポジウムプロシーディングス, 1975
- 11) 長松昭夫: モード解析入門, コロナ社, 1993