

論文 列車走行時の桁式高架橋橋脚の振動特性

金田 淳¹・石井 武司²・齋藤 邦夫³

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 JR東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 (〒331-0824 埼玉県さいたま市北区日進町二丁目479)

E-mail: j-kaneda@jreast.co.jp

²正会員 中央大学 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: t-ishii@kc.chuo-u.ac.jp

³正会員 中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

E-mail: saito@civil.chuo-u.ac.jp

高架橋上を走行する列車等から発生する振動が構造物を通じ地盤に伝播し地盤振動の問題を発生させる場合がある。列車速度が向上した場合の地盤振動の変化や、対策工事の効果を検証するための、地盤振動計算手法の確立が課題となっている。橋脚周辺の地盤振動を計算する場合、橋脚の主要な振動方向や回転成分の有無を適切に把握する必要がある。しかし、列車通過時の桁式高架橋の挙動について、特に水平成分や回転成分を考慮した研究事例は少ない。そこで筆者らは列車通過時の橋脚挙動を把握するために、列車通過時の振動加速度測定を実施し、以下の知見を得た。桁式高架橋の橋脚から周辺の地盤への振動伝播状況に着目した場合、列車通過時の橋脚の主要な振動は鉛直成分と線路方向水平成分が卓越している。このうち線路方向水平成分は線路直角方向を軸とした回転挙動に起因したものであること、橋脚の線路直角方向を軸とした回転挙動は桁の曲げ挙動との相関が高いこと等の知見を得た。

Key Words : ground vibration, traffic vibration, girder type viaduct, pier, vibration characteristic

1. はじめに

高架橋上を走行する列車等が発生する振動が構造物を通じ地盤に伝播し地盤振動の問題を発生させる場合がある。列車速度が向上した場合の地盤振動の変化や、対策工事の効果を検証するための地盤振動計算手法の確立が課題となっている。桁式高架橋の橋脚周辺の地盤振動を計算する方法の一つとして軸対称有限要素法を活用した方法が提案されている。¹⁾

この手法により橋脚周辺の地盤振動を計算する場合、橋脚の振動方向や回転成分を適切に把握し、加振力として定める必要がある。桁式高架橋の橋脚の振動特性について、起振器による加振時や210km/hで走行する新幹線列車走行時の橋脚・桁および周辺地盤の加速度を測定・分析により振動特性を検討した事例が報告²⁾されている。しかし、新幹線走行時の振動特性については鉛直成分に着目した整理であり、水平方向の振動特性は明らかになっていない。

そこで、本論文では列車走行に起因する桁式高架橋の橋脚の振動特性を把握するために、列車通過時の橋脚の振動を三成分加速度センサーにより測定した結果につい

て主要な振動方向や、列車速度の変化に伴う振動の変化に着目し整理、考察を行った結果について述べる。

2. 桁式高架橋橋脚基部の振動測定

(1) 測定概要

本章では橋脚基部の加速度を測定した結果について記す。図-1に測定対象の橋脚の概要を示す。A高架橋は橋長15mで基礎構造は杭基礎である。B高架橋は橋長15mで基礎構造は直接基礎である。C高架橋は橋長25mで基礎構造は杭基礎である。

測定にはCOLIBRYS社製のサーボ型3軸加速度センサー-SF3000Lを使用した。加速度センサーは橋脚の橋軸直角方向の面の中心部の地表面からの高さ50cmの位置に、鉛直方向がZ軸、橋軸方向がX軸、橋軸直角方向がY軸となるように取り付けた。加速度センサーからの出力は加速度時刻歴波形である。出力は有線で接続されたALNIC社製ワイヤレス信号処理ユニットRS-AD24により200Hzでサンプリングされる。サンプリングされたデータは直ちにBluetoothにより無線伝送されノート型PC内ハードディスクに記録される。列車の通過毎に

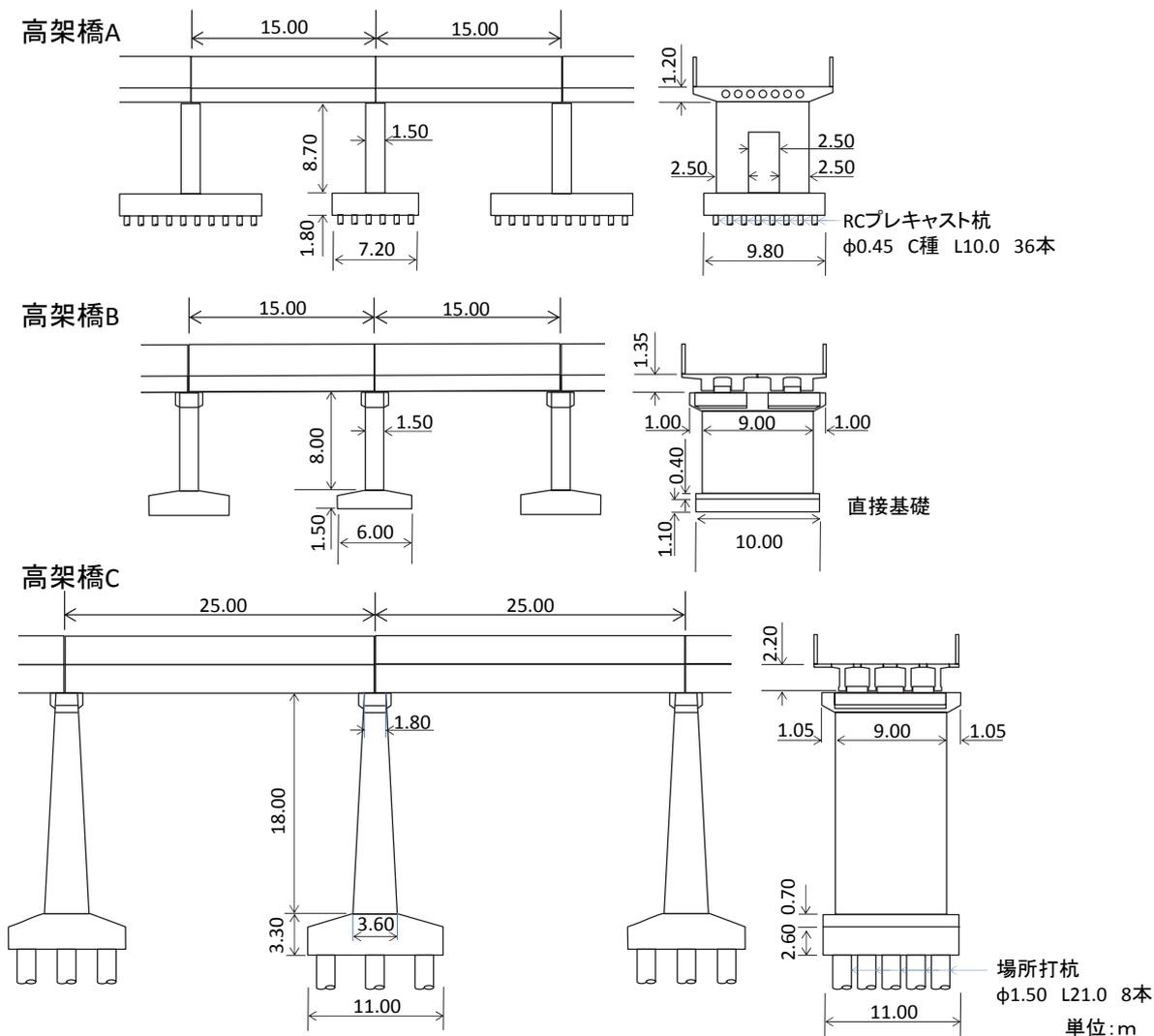


図-1 測定対象橋脚の概要図

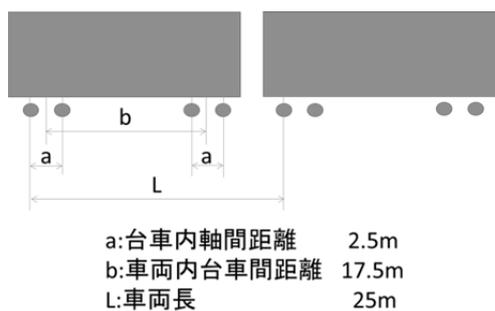


図-2 測定対象列車の軸配置

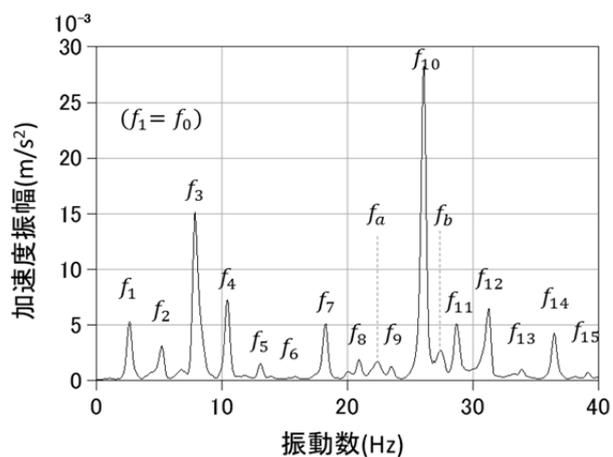


図-3 橋脚基部の振動の加速度振幅スペクトルの例

測定を実施し、通過列車の編成、走行方向と共に記録した。本論文では、10両編成の新幹線車両が加速度センサーに近接する側の軌道上を走行した際の振動データに着目して整理を行った。測定対象とした新幹線車両の軸配置を図-2に示す。

(2) 結果の整理方法

図-3は橋脚上を列車が通過した際の橋脚基部の振動加速度波形についてFFT処理を施し振幅スペクトルを描いたものである。スペクトルは一定間隔で鋭くスパイク上

に立ち上がる独特の形状をしている。これは車軸の繰り返し効果の特性³⁾によるものである。最も低い卓越振動数を基本振動数 f_0 、基本振動数の n 倍の振動数を n 次の卓越振動数 f_n とすると、図中に示す f_{15} までの範囲の卓越振動数はほぼ基本振動数の整数倍となっている。 f_8 と f_9 の間と f_{10} と f_{11} の間にはそれ以外の要因に起因すると思われる卓越振動数 f_a 、 f_b が存在しているが、数は少なく、振幅は小さい。

基本振動数は列車の速度と相関があり、今回測定対象とした新幹線専用車両の車軸配置の場合、列車速度 V と基本振動数 f_0 の関係は式(1)で表される。

$$f_0 = \frac{V}{3.6 \times 25} \quad (1)$$

本論では式(1)の関係を用いて測定列車の通過速度の評価を行っている。なお、別途実施した類似の測定においてデジタルビデオカメラにより 1/30 秒毎に撮影した列車通過時の画像から求めた列車速度と、橋脚基部の振動の振幅スペクトルから求めた列車速度の差は 1%以内であることを確認している⁴⁾。

振動の振動数特性を評価する場合、1/3 オクターブバンドスペクトルの形で整理する方法がよく用いられる。しかし、この場合、卓越振動数が 1/3 オクターブバンドの境界振動数付近を遷移する場合の振幅の変化がわかりにくい。そこで、今回の整理においては、卓越振動数毎に加速度振幅を評価することとした。なお、測定データのサンプリング振動数が 200Hz であることと測定対象の列車の速度が概ね 220km/h—320km/h の範囲であったことを鑑み、1~15 次の卓越振動数を対象として整理をおこなった。この場合、振動数としては概ね 53Hz までの範囲を対象とすることになる。以下に n 次の卓越振動数 f_n における振幅の評価方法を述べる。また、図-4 に振幅評価過程の一例を示す。

a) バンドパスフィルタ処理

測定された加速度振幅の時刻歴波形に下限振動数を $(n - 0.5) \times f_0$ 、上限振動数 $(n + 0.5) \times f_0$ としたバンドパスフィルタを適用する。

b) 実効値処理

バンドパスフィルタ適用後の時刻歴波形に対して実効値処理を施す。時定数は JISC1510 振動レベル計を参考に 0.63 を使用した。

c) 振幅値の評価

実効値の最大値を加速度振幅値として評価する。評価は X,Y,Z の各成分に対して実施した。

(3) 測定結果

図-3(a)に高架橋 A の測定データを整理した結果を示す。卓越振動数の次数、振動方向、速度の違いによる振

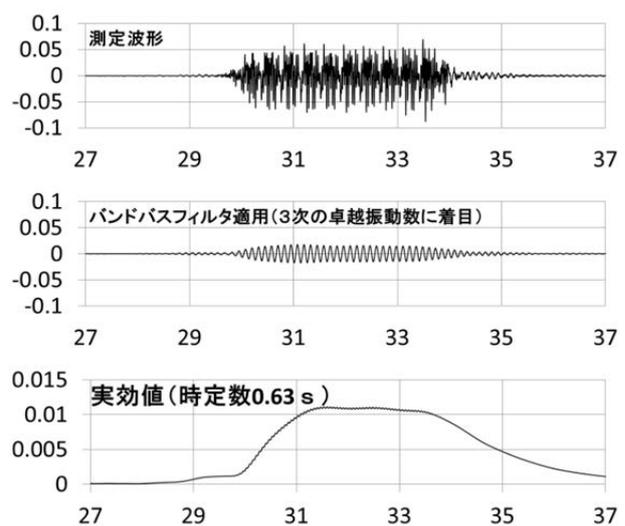


図-4 加速度振幅評価の例

幅の増減傾向を把握するため、縦軸は正規化した振動加速度レベル、横軸を対数軸の振動数としてグラフにまとめた。振動数と振動レベルの関係をプロットすると共に、一次関数で近似した直線も重ねて描いている。高架橋間の比較を容易にすることを目的とし、一次の卓越振動数の鉛直方向成分の近似曲線において 270km/h の速度の振動加速度レベルが 0dB となるように正規化を行っている。図-5(a)は高次の卓越振動数の領域でプロットが密集し、変化の傾向や値のばらつきが把握しにくい。そこで、速度と振幅の変化の関係を次数毎に整理したものが図-5(b)である。横軸を速度とし、次数に応じたオフセットを与えながら値をプロットしている。補助目盛線の 1 目盛りは 50km/h の速度変化を表している。今回の整理対象とした列車の走行速度は約 220~320km/h であったことから、補助目盛線の位置が 270km/h となるように、結果をプロットした。

高架橋 B,C についても同様に整理した結果を図-5(c)-(f)に記載した。

卓越振動数の次数による振幅の大小に着目すると、いずれの高架橋においても、5 次、15 次の振幅が小さく、3 次、10 次といったその中間の次数の振幅が大きいことがすべての高架橋についていえる。この現象は既往の研究でも確認されており、軸の繰り返し効果の影響と考えられている。³⁾

速度の増加に伴う振幅の変化の傾向について着目する。卓越振動数の次数により傾きは異なっており、速度が増加するにも関わらず振幅が小さくなる場合があることが分かる。また、卓越振動数の次数が同じであっても、振動方向により増減の傾向が異なる場合も確認された。なお、速度がほぼ同一であるにもかかわらず加速度レベルに差が生じている場合がある。これは、速度以外の車両の条件(例えば乗車率等)による影響と推定される。

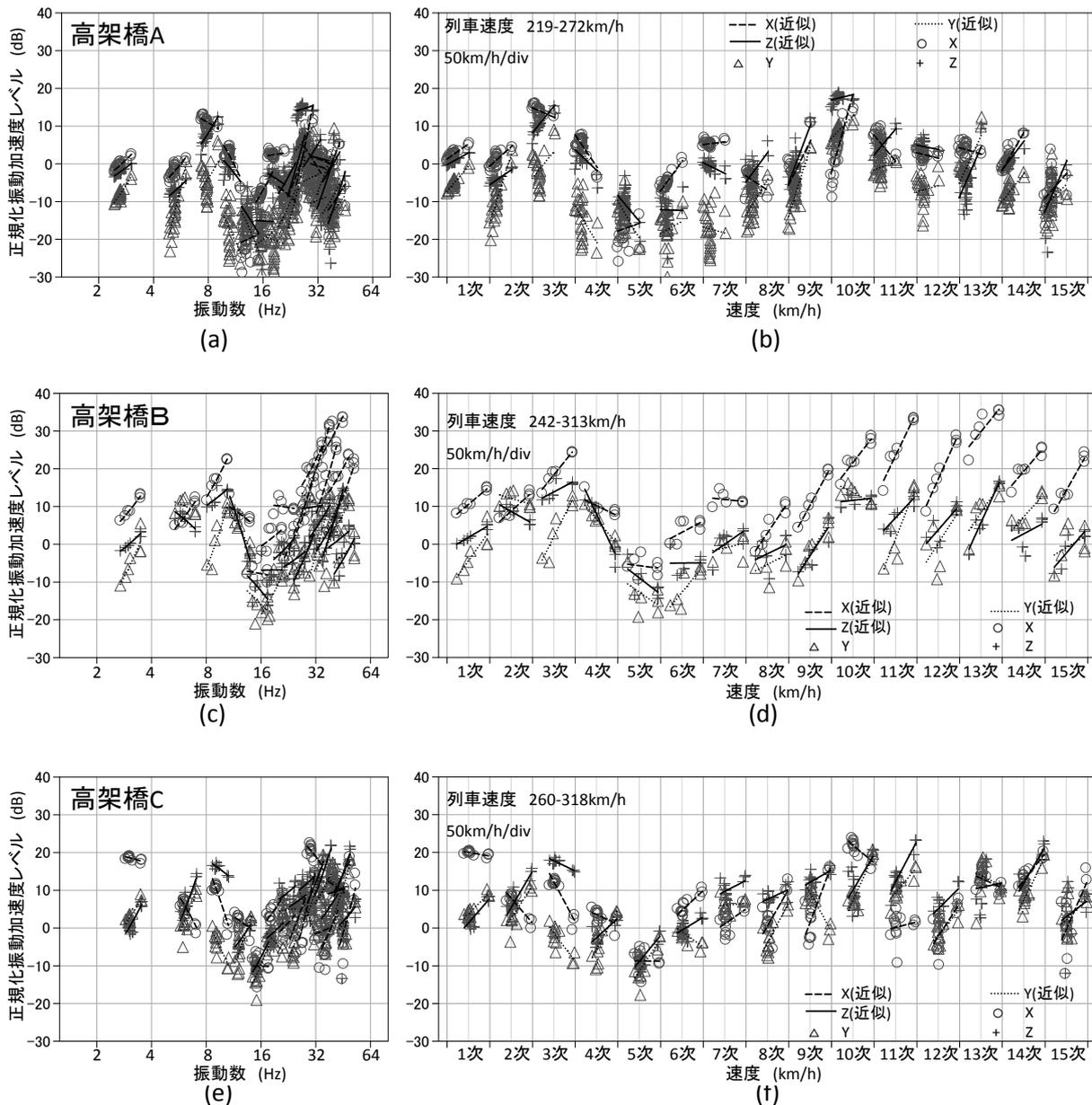


図-5 橋脚基部の振動の卓越振動数と振幅値の整理

振動方向ごとの振幅の大小関係に着目する。主要な振動方向は卓越振動数の次数や高架橋により異なっている。卓越振動数ごとの最大の振幅を示す振動方向に着目した場合、橋軸方向か鉛直方向のどちらかとなる場合がほとんどで、橋軸直角方向が最大となることはまれである。最大の振幅を示す卓越振動数の次数においては橋軸直角方向が最大の振幅を示している場合はなく、本測定範囲においては、橋脚の主要な振動方向は鉛直方向、橋軸方向であるといえる。

橋軸方向の振動については橋脚のロッキング挙動によるものと推定できる。しかし、橋脚基部1点の加速度からロッキング振動の性状を明らかにすることは難しい。そこで、橋脚および隣接桁の複数個所に加速度センサーを取り付け、列車走行時の振動測定を実施した。結果に

ついて次章で述べる。

3. 橋脚および隣接桁の列車走行時の振動加速度測定

(1) 測定概要

本章では橋脚基部の橋軸方向の振動をもたらす橋脚の挙動の性状を明らかにするため、A高架橋で実施した測定の結果について述べる。以下に測定の概要を記す。

測定には建診技術研究所社製のMEMS型三成分加速度センサーJRC-VM03を使用した。このセンサーは筐体内にBluetoothによる無線伝送機能を有しており、前章での測定と同様の方法でデータの収録が可能である。前章で記述した測定と同様にサンプリング周波数200Hzで振動加速度波形を記録した。

加速度センサーの取り付け位置を図-6に示す。前章の測定で設置した橋脚基部に加え、橋軸方向の面の上部に2カ所、隣接する桁の端部下面の2カ所にセンサーを取り付けた。

(2) 測定結果

データの整理方法は前章と同様とし、卓越振動数と振幅の関係を求めた。回転、ねじれの影響を把握するため、センサーを設置した2点間の相対加速度振幅についても整理している。

a) 鉛直軸まわりのねじりの影響

図-7に橋脚の上部に設置した2つセンサー（PHD80, PHU80）の橋軸方向の応答について整理した結果を示す。8次から10次の卓越振動数において、相対加速度の振幅が絶対加速度の振幅を上回っている。これは二つの加速度の位相のずれが逆位相に近いことを示している。よって、8次から10次の卓越振動数が遷移する帯

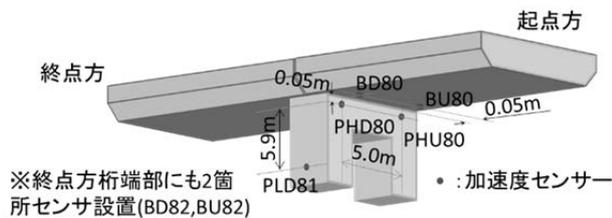


図-6 センサー設置位置

域のうち23Hzから27Hzにおいて、橋脚の鉛直軸まわりのねじり挙動が生じていると考えられる。相対加速度が最大値を示すは10次の卓越振動数が26.4Hzの時であり、その値は20.8dBである。図-8に相対加速度が最大時の橋脚挙動の概要図を示す。図中には各センサーの線路方向成分の応答を黒色の矢印及び点で示した。矢印の長さは加速度の振幅に比例するように図示している。なお振幅が相対加速度の10%未満の場合は黒点として示している。

b) 線路方向ロッキングの影響

図-9に橋脚の上下に設置したセンサー（PHD80, PLD81）の線路方向の応答について整理した結果を示す。線路方向のロッキングについて検証している。上部の加速度のセンサー（PHD80）の応答は下部のセンサーの応答（PLD81）より大きく、線路方向にロッキング挙動をしていると考えられる。相対加速度が大きくなる傾向は2次から10次の卓越振動数が遷移する2Hzから32Hzの広い範囲で確認できる。また、この範囲のうち卓越振動数が3次と7次の領域は柱基部の加速度も大きい。相対加速度



図-8 橋脚挙動概要図（鉛直軸周りのねじり）

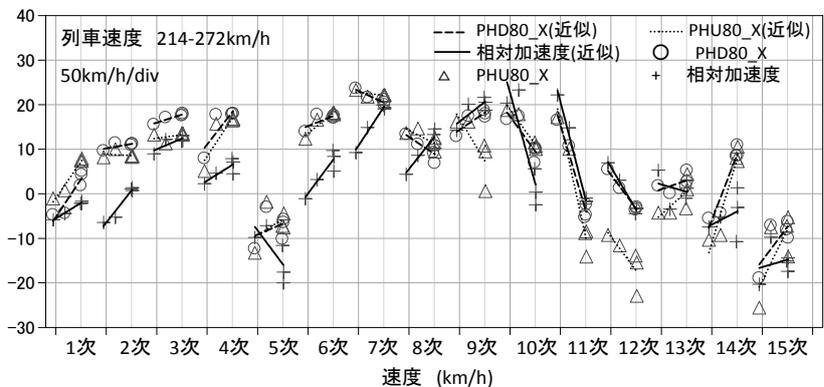
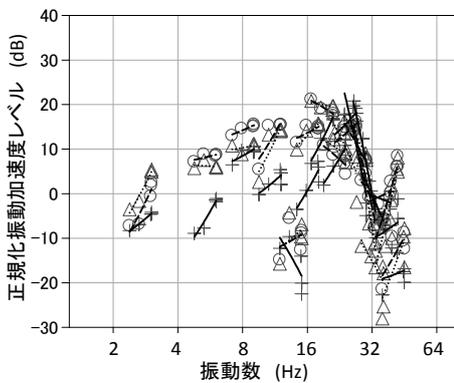


図-7 橋脚上部の左右間の加速度応答の差

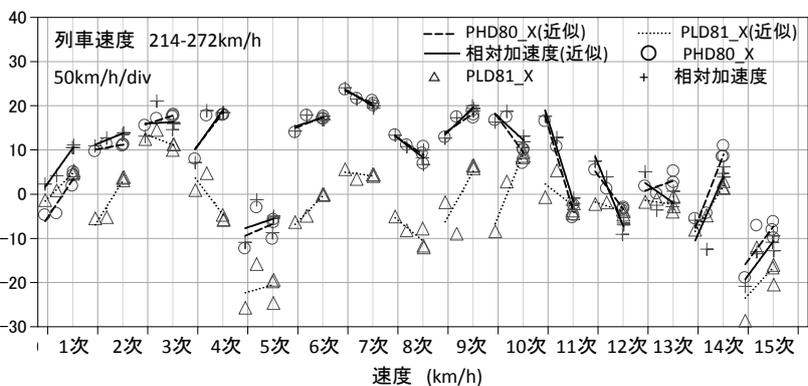
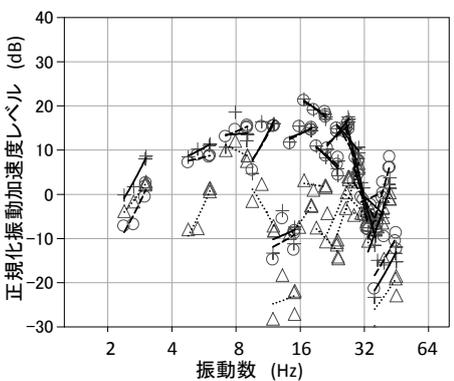


図-9 橋脚下部と上部の加速度応答の差（橋軸方向）

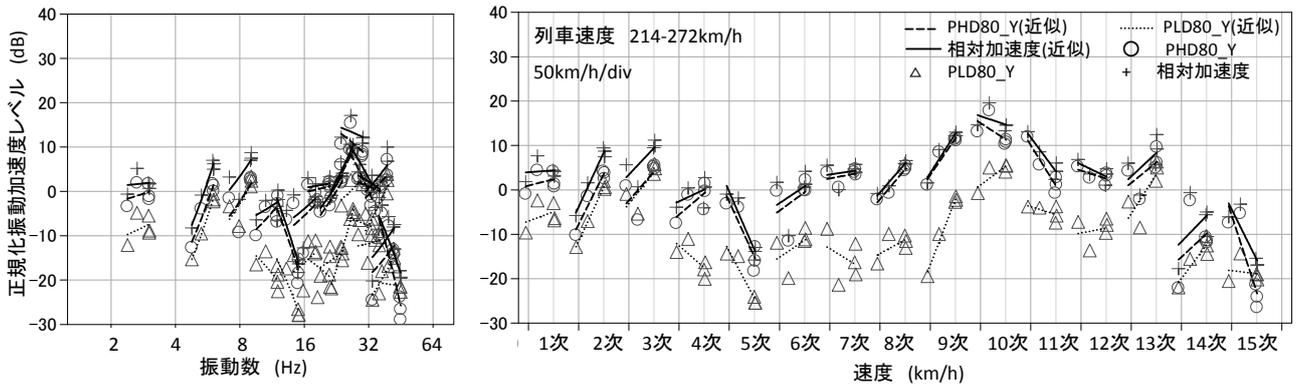


図-11 橋脚下部と上部の加速度応答の差（橋軸直角方向）

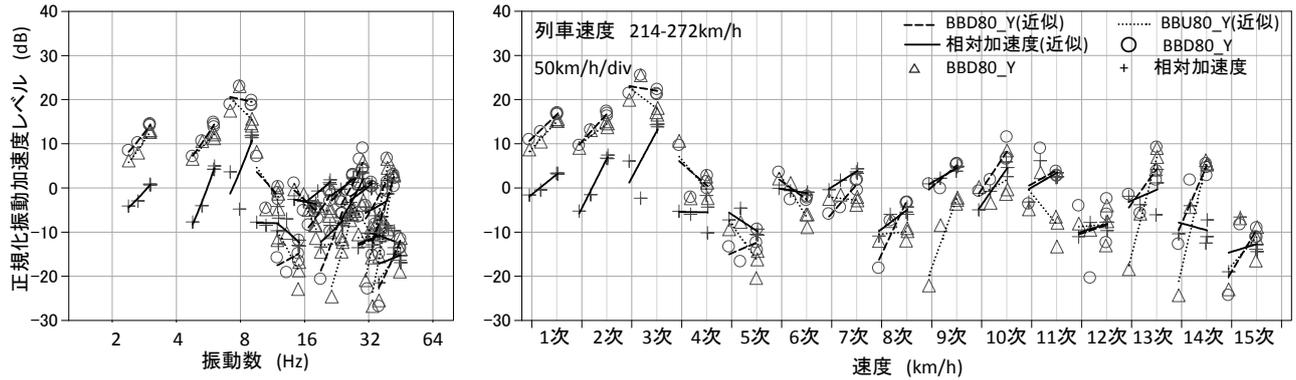


図-13 桁端部の加速度応答（起点側桁端部）

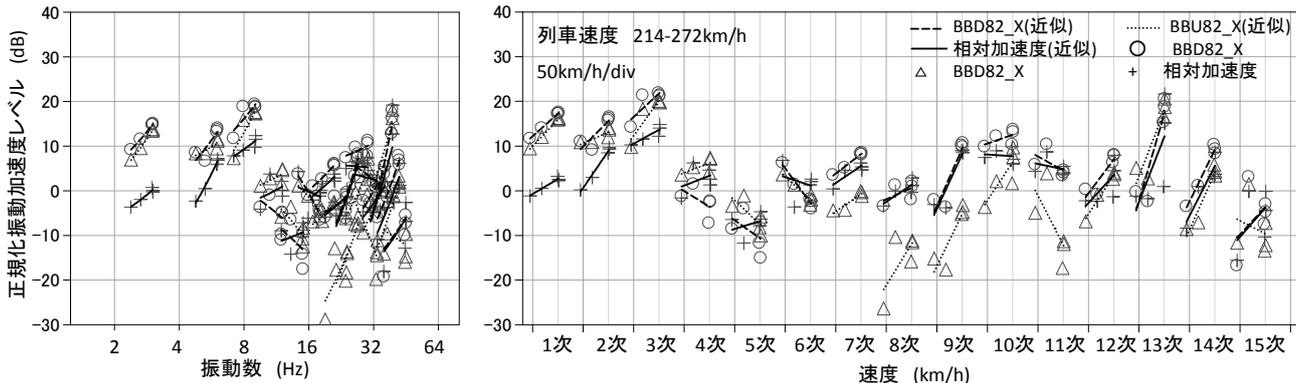


図-14 桁端部の加速度応答（終点側桁端部）

が最大値を示すは7次の卓越振動数が16.7Hzの時であり、その値は21.6dBである。相対加速度が次に大きいのは3次の卓越振動数が7.9Hzの時であり、その値は18.6dBである。それぞれの挙動の概要を図-10に示す。

c) 線路直角方向のロッキングの影響

図-11に橋脚の上下に設置したセンサー（PHD80,PLD81）の線路直角方向の応答について整理した結果を示す。線路直角方向のロッキングについて検証している。上部の加速度のセンサー（PHD80）の応答は下部のセンサーの応答（PLD81）より大きく、線路直角方向にロッキング挙動をしていると考えられる。相対加速度が最大値を示すは10次の卓越振動数が26.4Hzの時であり、その値は17.2dBである。図-12に挙動の概要を示す。

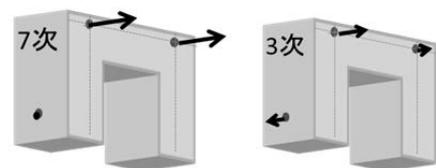


図-10 橋脚挙動概要図（線路方向ロッキング）

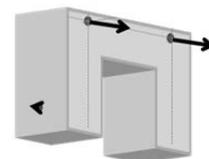


図-12 挙動概要図（線路直角方向成分）

d) 桁端部の振動

起点方の桁端部に取り付けた加速度センサー（BD80,BU80,BD82,BU82）の橋軸方向の応答を整理した結果を図-13、図-14に示す。絶対加速度が最大の応答

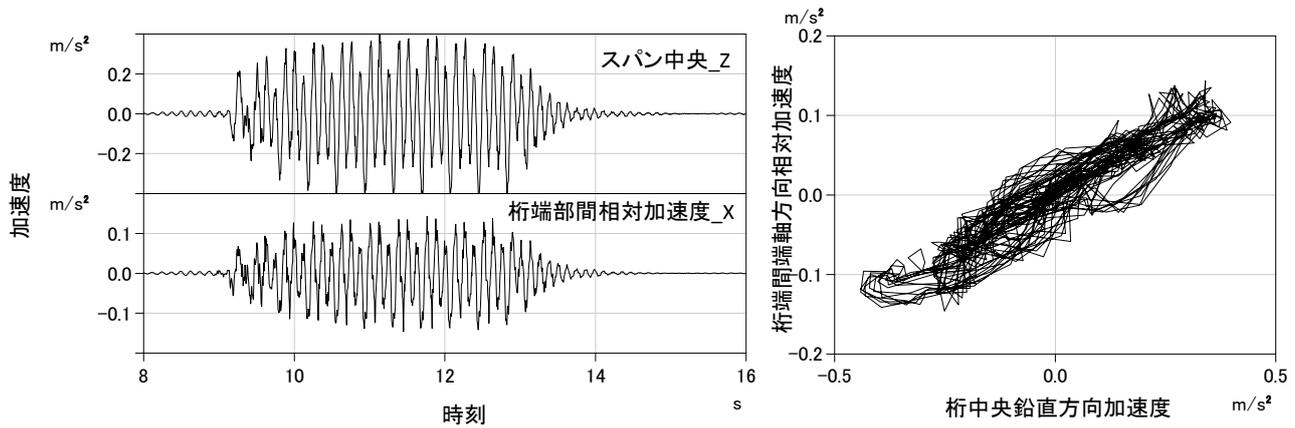


図-15 桁端部間の橋軸方向相対加速度とスパン中央部鉛直方向加速度

を示すのは3次の卓越振動数の領域である。3次の卓越振動数においては橋脚上部の加速度センサー（PHD80）よりも応答が大きい。また、3次の卓越振動数の領域における相対加速度は絶対加速度に比べ小さく、橋脚に鉛直軸周りのねじれを生じさせるような位相差は小さい。4次以上の卓越振動数においては、絶対加速度の振幅は小さい。しかし、上り線側と下り線側の差が大きく、相対加速度のものが大振幅を示す絶対加速度に近い値を示している場合もあり、桁端部が橋脚に鉛直軸周りのねじれを生じさせるような挙動をする場合があることが分かる。

4. 考察

高架橋Aの橋脚の橋軸方向の振動の発生要因について考える。桁、橋脚上部、橋脚基部で共通して大きな振幅を示すのが3次の卓越振動数であった。振幅の大きい方より桁、橋脚上部、橋脚基部の順となっていることから、桁の挙動により橋脚の上部に橋軸方向の力が加わっていると考えられる。

図-15に前章で測定した高架橋Aの起点方の桁のスパン中央部の鉛直方向、両側の桁端間の橋軸方向の相対加速度を示す。右側のグラフは横軸は時刻、縦軸は加速度とした時刻歴波形である。グラフから、桁端部間の相対加速度の応答と、スパン中央部の鉛直方向の応答は同様の形状を示している。左側のグラフは各時刻の桁中央鉛直加速度と橋軸方向相対加速度をそれぞれ横軸と縦軸にプロットしたもので、プロットはほぼ直線状に分布していることがわかる。2つの加速度振幅の相関係数は0.93であった。このことより、桁端部の橋軸方向の応答と、スパン中央部の鉛直方向の応答に高い相関関係があるこ

とがわかる。これらのことより、橋脚の橋軸方向の挙動は桁の曲げ挙動との相関が高いと言える。

5. まとめ

桁式高架橋の橋脚において、列車通過時の振動加速度測定を実施した結果、以下の知見を得た。

桁式高架橋の橋脚から周辺の地盤への振動伝播状況に着目した場合、列車通過時の橋脚基部の主要な振動は鉛直成分と橋軸方向の水平成分である。

橋軸方向水平成分は橋軸直角方向を軸とした回転挙動に起因したものである。

橋脚の橋軸直角方向を軸とした回転挙動は隣接する桁の曲げ挙動との相関が高い。

参考文献

- 1) 谷口美佐, 渡邊康夫, 清水満: 地盤振動の解析的検討手法の開発, JR EAST Technical Review, No37, 2011.
- 2) 江島淳: 新幹線鉄道の桁式高架橋における地盤振動低減対策のための基礎的研究, 鉄道総研報告, No.1192, 学位論文, 1981.
- 3) 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No.30, 268p., 1999.
- 4) 山田和史, 谷口美佐, 金田淳, 石井武司, 齋藤邦夫: 列車の走行時に生じる振動伝搬に関する検討, 第48回地盤工学研究発表会, 2013.

(2017.4.7 受付)

VIBRATION CHARACTERISTICS OF PIERS VIBRATED BY TRAINS TRAVELING ON GIRDER-TYPE VIADUCT

Jun KANEDA, Takeshi ISHII and Kunio SAITOH

Vibration of reinforced concrete viaducts under train passage can cause an issue of ground vibration which is propagated through a soil and structure. There is a subject of establishment of a calculation method of the ground vibration to investigate change of that when train speed increases and effect of countermeasures. In calculation of the ground vibration around piers, proper understanding of principal direction and presence of rocking components of the vibration of the piers is required. However, few studies are performed considering sway and rocking components of the vibration in girder type viaducts under train passage in particularly. Hence, authors performed measurement of acceleration of the piers of the girder type viaduct under train passage to investigate behaviour of the piers, and then obtained the following findings. Vertical and bridge axial direction components of principal vibration of piers under train passage were predominant when propagation condition of vibration from the piers to ground was focused. It was found that the components at bridge axial direction were caused by the rocking behaviour at direction perpendicular to the axial direction of the piers which was well correlated with flexural vibration of girders.