

# 列車高速走行時における桁式高架橋区間の地盤振動の現象解明

権藤 徹\* 野寄 真徳\* 横山 秀史\*

Analysis of Ground Vibration  
Caused by High-Speed Train Running through Viaduct

Toru GONDO Masanori NOYORI Hidefumi YOKOYAMA

In this report, we analyze the phenomenon where ground vibration in the low frequency band below 5 Hz increase when a high-speed train runs through a viaduct. As a result, we find that the cause of the phenomenon is that increasing train speed shifts the peak frequency of the excitation force due to a train running to the higher frequency side, which is close to the frequency response function of structures and ground. In addition, we reveal that the first bending mode of girders resonates with the excitation force of a train running. From this, we show the possibility that the first bending mode of girders can correspond to the peak of the frequency response function of structures and ground.  
キーワード：地盤振動，桁式高架橋，列車高速走行，数値シミュレーション，共振

## 1. はじめに

列車走行により沿線に生じる地盤振動は、その大きさ次第では環境上の問題となることがある。過去に行われた軟弱地盤上のラーメン高架橋区間における速度向上試験時の地盤振動では、列車速度 300km/h 以上の高速走行において、従来見られなかった 4Hz 前後の低周波数帯域の地盤振動が他の周波数帯域よりも増大する現象が報告されている<sup>1)</sup>。また、列車走行による地盤振動の対策として、軌道支持ばね係数の低弾性化<sup>2)</sup>や地盤内における波動遮断物の設置<sup>3)</sup>などが実用化されているが、低周波数帯域での効果は小さく、上記現象の対策は難しいと考える。

以上のことから、今後更なる列車速度の向上を検討していくうえで、構造物や地盤の条件によっては、上記の現象が問題となることが想定される。

そこで、本報告では現状の営業速度を大きく超える列車高速走行時に低周波数帯域の地盤振動が増大する現象の解明を行った結果を報告する。検討にあたっては、対

象とした桁式高架橋区間の現地調査を行い、構造物および地盤の条件を把握した。次に、調査結果を基に対象区間の地盤振動を再現出来る解析モデルを作成し、数値シミュレーション結果から現象解明を行った。

なお、ここでは振動の増大が報告されている 4Hz 前後を含む 5Hz 以下の低周波数帯域を対象とする。

## 2. 現地調査

本章では、数値シミュレーションの解析モデルを作成するために、対象とした桁式高架橋区間で現地調査を行い、現地調査データから桁の固有周波数と地盤の速度構造を推定した。

対象区間を図 1 に示す。対象箇所は単純桁が連続する区間であり、円柱橋脚 (P2, P3) に挟まれた桁 (T2) のスパンは 49m, それ以外の桁 (T1, T3, T4) はスパン 33m である。軌道はスラブ軌道である。地盤の柱状図を図 2 に示す。対象区間の地盤は N 値 5 未満の層が深さ 4m 程度まで存在し、その下に礫混じりの層がある。

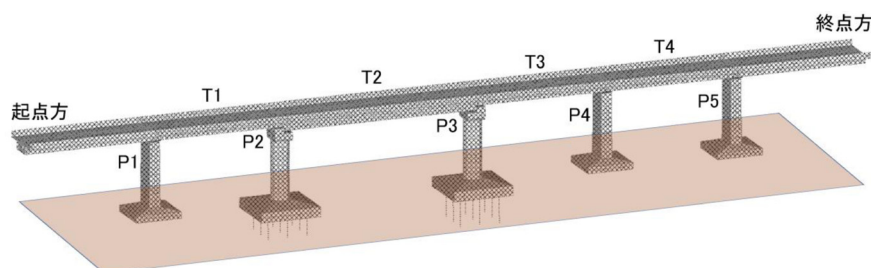


図 1 桁式高架橋区間

\* 防災技術研究部 地質研究室

また、深さ 17m 以深には比較的安定した地盤があることがわかる。基礎の形式は、円柱橋脚部分が杭基礎、それ以外の壁式橋脚部分 (P1, P4, P5) が直接基礎である。

### 2.1 桁の固有周波数

桁の固有周波数を把握するため、T4 にて常時微動測定を行った。T4 上に設置した振動レベル計の測点配置を図 3 に示す。測定した常時微動のパワースペクトルおよびクロススペクトルから、実験モード解析<sup>4)</sup> により桁の曲げ 1 次モードの固有周波数を同定した。上り線側の S1 ~ S5 で測定した常時微動のパワースペクトルを図 4 に示す。各ピーク周波数に対応したモード形状を同定し、理論上の桁の曲げ 1 次モード形状との誤差を評価した。その結果、4.54Hz のモードにおける誤差が最も小さく、T4 の曲げ 1 次モードの固有周波数を 4.54Hz と推定した。T4 の周波数 4.54Hz におけるモード形状を図 5 に示す。

### 2.2 地盤の速度構造

地盤の速度構造を推定するため、表面波探査<sup>5)</sup> を実施した。表面波探査で得られた位相速度曲線から逆解析で推定した地盤の S 波速度構造を図 6 に示す。対象区間の地盤表層には S 波速度 100 m/s 未満の層があり、深さ 4.2 m 程度まで分布していることがわかる。また、深さ 20m 以深には比較的安定した地盤があることがわかる。これらは図 2 に示した柱状図の特徴と一致していると考えられる。

図 6 に示した地盤の S 波速度構造から求めたレイリー波の理論伝達関数を図 7 に示す。対象区間の地盤は概ね 11Hz 付近を境に低周波数側では応答が小さく、高周波数側では比較的平坦な応答となっていることがわかる。11Hz 付近に基本モードのピークがあり、他の周波数帯域より地盤振動が伝播しやすいことがわかる。

## 3. 数値シミュレーション

2 章の現地調査結果と図面等に基づいて数値シミュレーションの解析モデルを作成し、対象区間における地盤振動の再現解析を行った。

### 3.1 数値シミュレーションの概要

列車走行時の沿線地盤振動の数値シミュレーションとして、列車・構造物系の動的連成解析と構造物・地盤系の動的応答解析を結合した手法<sup>6)</sup> を用いた。まず、列車と構造物の相互作用を考慮したサブストラクチャー法による動的連成解析を行い、列車走行により構造物に入力される加振力を算出する。次に、構造物と地盤の相互作用を考慮した周波数領域における動的応答解析に動的連成解析で算出した加振力を入力し、地盤振動を出力する。動的連成解析には DALIA (㈱構造計画研究所)、

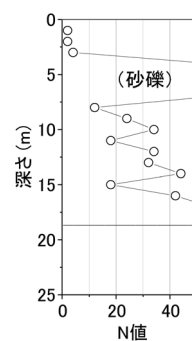


図 2 柱状図

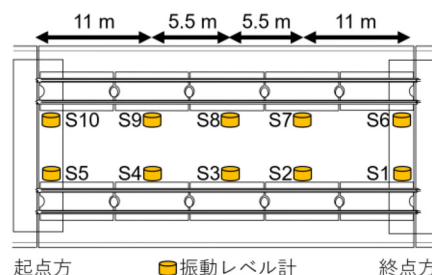


図 3 T4 の測定配置

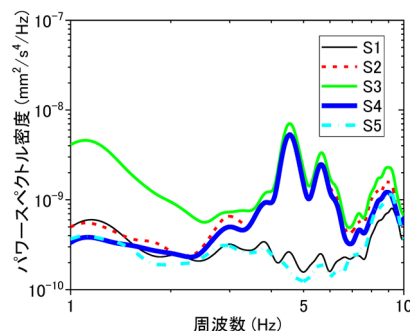


図 4 T4 における常時微動のパワースペクトル

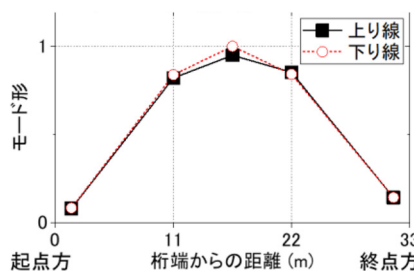


図 5 T4 の曲げ 1 次モード形状 (4.52Hz)

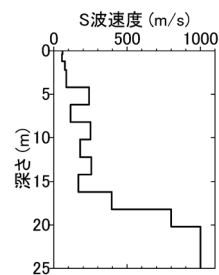


図 6 地盤の S 波速度構造

表1 構造物の材料物性値

部材	ヤング係数 (kN/m <sup>2</sup> )	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
桁	4.00E+07	24.5	0.200
橋脚	3.42E+07	24.5	0.200
フーチング 杭	3.03E+07	24.5	0.200

表2 地盤の物性値

深度 (m)	せん断弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	ポアソン比
0~0.9	4.70E+03	1.50E+03	0.499
0.9~1.9	8.66E+03	1.50E+03	0.499
1.9~2.9	1.08E+04	1.50E+03	0.498
2.9~4.9	1.15E+05	1.50E+03	0.487
4.9~6.9	2.38E+04	2.00E+03	0.497
6.9~8.9	1.19E+05	1.80E+03	0.486
8.9~10.9	6.15E+04	1.90E+03	0.493
10.9~12.9	1.30E+05	1.90E+03	0.485
12.9~14.9	5.36E+04	2.00E+03	0.494
14.9~16.9	2.96E+05	1.90E+03	0.463
16.9~20.9	1.41E+06	1.90E+03	0.301
20.9~120.9	2.20E+06	2.20E+03	0.100

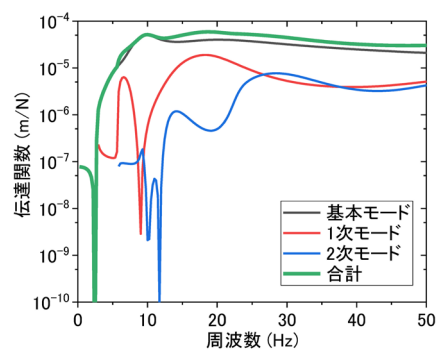


図7 レイリー波の理論伝達関数

動的応答解析には SuperFLUSH/3DS (㈱構造計画研究所) を用いた。

列車・構造物系の動的連成解析の解析モデルを図8に示す。地盤振動では一般的に鉛直方向のみを対象とするため、動的連成解析の解析モデルは、線路直交方向の応答を考慮しない2次元モデルとした。構造物はビーム要素をばね要素およびダンパー要素で結合することにより作成した。車両は標準的な新幹線車両で8両編成とし、列車速度は280km/hと398km/hを想定した。

構造物・地盤系の動的応答解析の解析モデルを図9に示す。動的応答解析の解析モデルは構造物を3次元FEM、地盤を薄層要素法とした。高架橋の箱桁はシェル要素、橋脚およびフーチングはソリッド要素、杭はビーム要素によりモデル化した。節点数は16414、要素数は15296である。構造物の材料物性値はT4の曲げ1次モードの固有周波数が2.1節で推定した結果(図5)と整合するように設定した。また、地盤の物性値は2.2節で推定したS波速度構造(図6)に基づいて設定した。構造物の材料物性値と地盤の物性値を表1、表2に示す。構

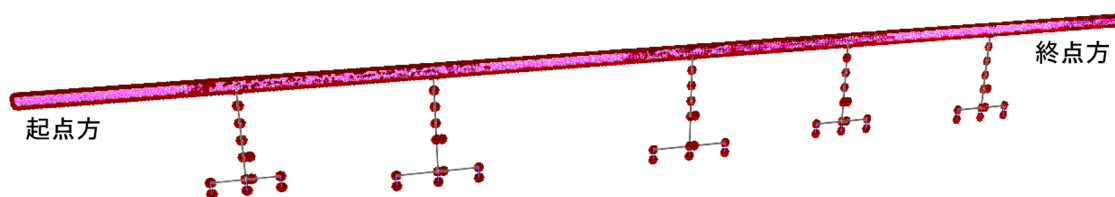


図8 時刻歴応答解析の解析モデル

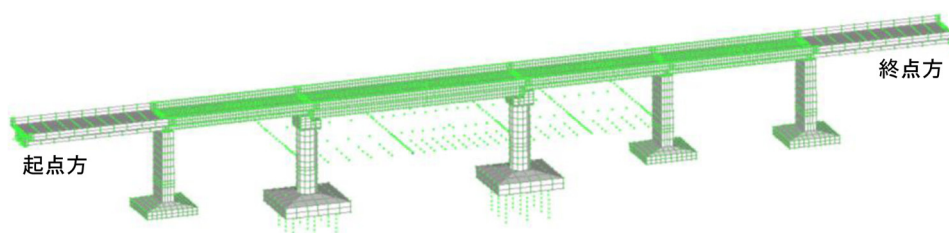


図9 周波数応答解析の解析モデル

造物および地盤の減衰比は全て 2% に設定した。加振点は高架橋の床スラブ上にある左右の各レール締結装置の位置に設定した。基本の締結装置間隔は 0.625m であり、片側に 241 点ずつ、計 482 点である。加振範囲は約 150m である。出力点は、P4 の中心から橋軸直角方向に 9.5m 離れた地盤上の位置とした。

### 3.2 再現解析の結果

列車速度 280km/h と 398km/h における数値シミュレーション結果を、実測記録と併せて図 10 に示す。列車速度 280km/h において 3.15Hz 帯域にあったピークが、列車速度 398km/h では 4～5Hz 帯域にシフトしており、振動加速度レベルが大きくなっていることがわかる。列車速度が 280km/h から 398km/h に増加するとともに、4～5Hz 帯域の地盤振動が増大する現象など、数値シミュレーションで実際の地盤振動を再現出来ることが確認出来た。

したがって、以降の章ではこの解析モデルを用いて、列車速度の増加により 4～5Hz 帯域の地盤振動が増大する現象の解明を行った。

## 4. 数値シミュレーションを用いた現象の解明

沿線地盤振動の応答は、列車走行による加振力特性と構造物・地盤の伝播特性により決定される。本章では、前章で確認された現象の原因を解明するため、地盤振動の応答を列車走行による加振力特性と構造物・地盤の伝播特性に分離して検討した。

### 4.1 加振力特性の検討

列車速度の増加とともに加振力の振幅増大が起きていれば、地盤振動の増大に直結することが考えられるので、列車速度の増加による加振力特性の変化について検討した。列車走行による平均加振力のフーリエスペクトルを図 11 に示す。図 11 には列車速度 280km/h および 398km/h の結果を示している。平均加振力は、列車・構造物系の動的連成解析で求めた全加振点における加振力に対して、列車速度に応じた遅延平均処理を行うことで求めた。

列車速度の増加とともに、3.15Hz 帯域にあったピークが 4～5Hz 帯域にシフトしており、この加振力のピーク周波数のシフトが、図 10 で確認された地盤振動のピーク周波数のシフトと対応していると考えられる。しかし、列車速度 280km/h における 3.15Hz 帯域のピークと列車速度 398km/h での 4～5Hz 帯域のピークの加振力がほとんど同じ大きさであることから、地盤振動増加現象の原因は加振力の振幅増大ではないことが確認された。

### 4.2 構造物・地盤の伝播特性の検討

構造物・地盤系の動的応答解析で求めた T3 から出力

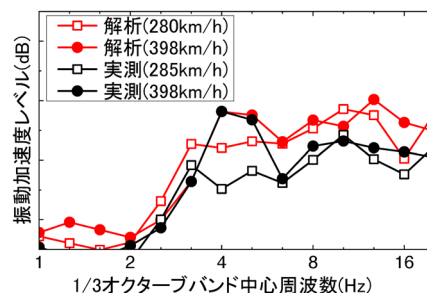


図 10 シミュレーション結果と実測記録の比較

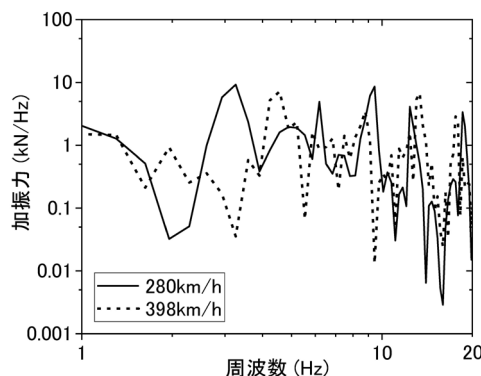


図 11 列車走行による平均加振力

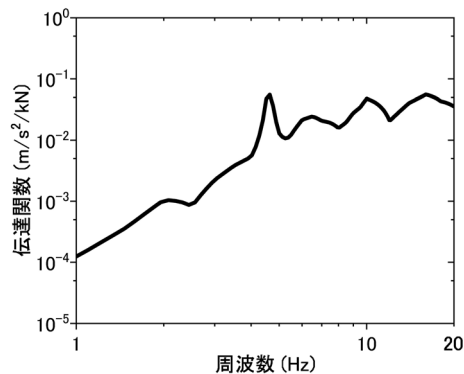


図 12 T3 から出力点までの平均加速度周波数応答関数（振幅成分）

点までの平均加速度周波数応答関数の振幅成分を図 12 に示す。これは、T3 上にある全加振点を 1 点ずつ加振して求めた出力点までの伝達関数の平均値である。4.5Hz 付近に鋭いピークがあり、列車走行による加振力が 3.15Hz 帯域と 4～5Hz 帯域において同じ大きさの場合、地盤振動の応答では 3.15Hz 帯域よりも 4～5Hz 帯域の方が 15 倍程度大きくなる事がわかる。また、周波数応答関数における 4.5Hz 付近のピークは、2.1 節で推定した T3 などスパン 33m の桁の曲げ 1 次モード (4.54Hz) に対応していると考えられる。

表3 有効質量比

モード番号	周波数 (Hz)	有効質量比 (%)	累積 (%)
1	1.61	0.00	0.00
2	1.61	0.00	0.00
3	1.66	0.03	0.03
4	2.15	0.00	0.03
5	3.13	9.46	9.49
6	3.16	0.00	9.49
7	4.16	0.00	9.49
8	4.56	3.05	12.54
9	4.56	17.29	29.82
10	4.59	3.68	33.51

### 4.3 現象の原因

前節の検討により、前章で確認された現象は、次のようにして生じたと考えられる。

- (1) 列車速度が280km/hから398km/hに増加することにより、列車走行による加振力のピーク周波数が3.15Hz帯域から4～5Hz帯域にシフトする。
- (2) 列車走行による加振力のピーク周波数が構造物・地盤の周波数応答関数のピーク周波数である4.5Hzに近接することで地盤振動が増大する。

## 5. 列車走行による加振と桁の曲げ1次モードの関係

前章の検討により、3章で確認された現象の原因は、列車速度の増加とともに、列車走行による加振力のピーク周波数が高周波数側にシフトすることで、構造物・地盤の周波数応答関数のピーク周波数に近接したことであることを明らかにした。また、構造物・地盤の周波数応答関数におけるピークはスパン33mの桁の曲げ1次モードに対応している可能性がわかった。したがって、列車走行による加振と桁の曲げ1次モードの関係について、数値シミュレーションを用いて検討した。

まず、各桁の曲げ1次モードを理論的に把握するため、図9の解析モデルに対してモード解析を行った。モード解析を行うにあたり、杭とフーチング底面の節点は完全固定とした。モード解析結果のうち、モード番号10番までの鉛直方向の有効質量比を表3に示す。モード番号は周波数が低い順に定義した。有効質量比が大きい、モー

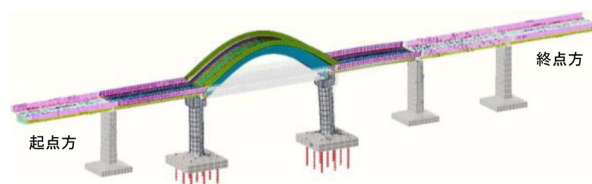


図13 モード形状 (5次モード: 3.13Hz)

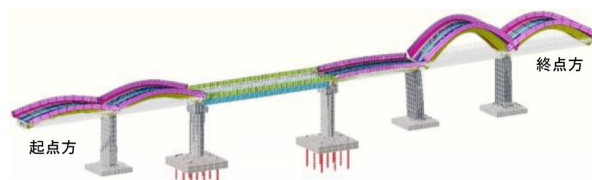


図14 モード形状 (9次モード: 4.56Hz)

ド番号5番(3.13Hz)と9番(4.56Hz)のモード形状を図13と図14に示す。5番はT2の曲げ1次モードである。また、9番はT4の曲げ1次モードであり、2.1節で同定された振動モードである。さらに、比較的有效質量比が大きいモード番号8番(4.56Hz)と10番(4.59Hz)のモード形状についても同様に確認したところ、8番と10番はそれぞれT1とT3の曲げ1次モードであった。

モード解析の結果から、対象区間の桁式高架橋においては、各桁の曲げ1次モードが支配的な振動モードであることがわかった。特に、モード番号8番と9番、10番の有効質量比の合計は約24%と大きいことから、スパン33mの桁の曲げ1次モードの影響が大きいことがわかった。

次に、列車走行中の各桁の挙動を把握するために、列車速度398km/hにおける、T2、T3のスパン中央の鉛直変位波形を図15示す。また、これらのフーリエスペクトルを図16に示す。図15の赤枠の部分において、T3のみ共振により増幅している波形が確認できる。図16より、このT3の共振周波数は4.5Hzであり、列車走行による加振力のピーク周波数(4.42Hz)とT3の曲げ1次モードの固有周波数(4.59Hz)との共振であると考えられる。列車走行による加振周波数 $F_l$ は式(1)より求めた<sup>7)</sup>。 $V$ は列車速度、 $L$ は車両長である。 $V=398\text{km/h}$ 、 $L=25\text{m}$ である。

$$F_l = V / (3.6 * L) \quad (1)$$

以上の結果から、スパン33mの桁の曲げ1次モードは、対象区間の桁式高架橋において最も影響が大きい振動モードであることがわかった。このスパン33mの桁の曲げ1次モードは、列車速度398km/hにおける列車走行による加振で共振を起こしていることから、図12

に示した構造物・地盤の平均加速度周波数応答関数における4.5Hz付近のピークの原因であると考えられる。

## 6. まとめ

本報告では、列車高速走行時における地盤振動の現象について、桁式高架橋区間を対象に数値シミュレーションを用いた原因の解明を行った。

得られた成果は以下の通りである。

- (1) 数値シミュレーションを用いて、対象区間における地盤振動の再現解析を行い、列車速度が280km/hから398km/hに増加するとともに、4～5Hz帯域の沿線地盤振動が増大する現象を再現出来ることが確認出来た。
- (2) 上記の現象を解明するため、地盤振動の応答を列車走行による加振力特性と構造物・地盤の伝播特性に分離して検討した。その結果、現象の原因は列車速度の増加とともに、列車走行による加振力のピーク周波数が高周波数側にシフトし、構造物・地盤の周波数応答関数のピーク周波数と近接したことであることを明らかにした。
- (3) スパン33mの桁の曲げ1次モードは、対象区間の桁式高架橋において最も影響が大きい振動モードであり、列車走行による加振で共振を起こしていることから、構造物・地盤の周波数応答関数におけるピークの原因である可能性がわかった。

今後の課題としては、今回の列車走行による加振力のピーク周波数と桁の曲げ1次モードの固有周波数は0.96倍(4.42Hz/4.59Hz)であったが、この値が1からどの程度外れた場合に、地盤振動に与える影響が無視できるのか整理する必要がある。さらに、桁にTMDやダンパーを設置することで桁の曲げ1次モードの有効質量比を低下させた場合に、地盤振動をどの程度低減することが出来るのか検討する必要がある。また、本報告では桁の曲げ1次モードの影響が大きかったが、桁の曲げ2次モードなど他の条件<sup>8)</sup>についても検討する必要がある。

## 文 献

- 1) 岩田直泰, 横山秀史, 芦谷公稔: 新幹線高速走行時の地盤振動特性, 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシ

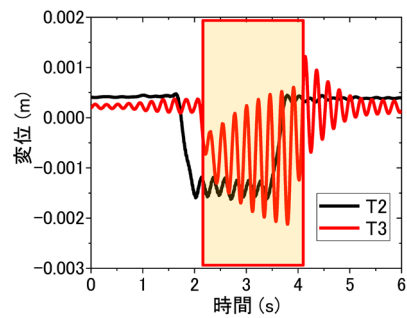


図 15 T2, T3 のスパン中央における鉛直変位

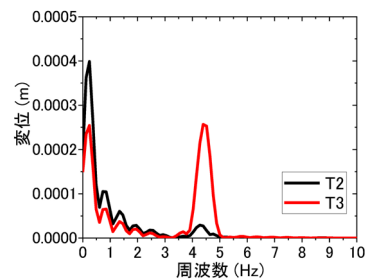


図 16 T2, T3 のスパン中央における鉛直変位のフーリエスペクトル

ンポジウム発表論文集, pp.135-138, 2004

- 2) 吉岡修, 芦谷公稔: 軌道の支持ばね係数低下が地盤振動に与える効果, 鉄道総研報告, Vol.5, No.9, pp.31-37, 1991
- 3) 芦谷公稔: 振動遮断工の防振効果算定方法, 鉄道総研報告, Vol.15, No.10, pp.33-38, 2001
- 4) モード解析ハンドブック編集委員会: モード解析ハンドブック, コロナ社, 2000
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 芦谷公稔, 岩田直泰, 横山秀史: 新幹線沿線地盤振動の列車速度依存性の評価方法, 地盤環境振動の予測と対策の新技术に関するシンポジウム発表論文集, pp.139-144, 2004
- 8) Ziyaeifar, M.: Vibration control in train-bridge-track systems, Vehicle System Dynamics. 46:5, pp.355-384, 2008.