

鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性

横山 秀史* 八代 和幸*
 蒲原 章裕* 岩田 直泰**

Propagation Characteristics of Horizontal and Vertical Component of Train-induced Ground Vibration

Hidehumi YOKOYAMA Kazuyuki YASHIRO
 Akihiro KAMOHARA Naoyasu IWATA

Field measurements were carried out at four sites to estimate the propagation characteristics of train-induced ground vibration along two Shinkansen lines. According to the measurements, train speed and axle arrangement, which determines the basic characteristics of exciting force, hardly affected both horizontal and vertical components of the attenuation spectra of ground vibration. Therefore, the attenuation spectra of these sites can be estimated with a simple simulation model without incorporating exciting force characteristics. Most of the vibration attenuated within 10 meters from the track center.

キーワード：地盤振動，伝播特性，鉛直動，水平動

1. はじめに

鉄道沿線地盤振動の評価・対策のためには、構造物近傍から沿線までの振動の伝播メカニズムを把握することが不可欠である。鉄道総研では、これまで主に200～240km/h程度の速度で走行する新幹線から生じる鉄道振動の鉛直成分を対象として高架橋から沿線地盤までの振動伝播特性を整理した¹⁾。

近年新幹線の高速化にともない、高速走行試験においても従来よりも高い速度での試験が行われている。鉄道総研でも、高速試験列車走行時の地盤振動特性について、実測や解析モデル等にもとづく検討を行い基本特性を把握した²⁻⁴⁾。

環境振動については、「環境保全上緊急を要する新幹線鉄道振動対策について(勧告)」や振動規制法等において鉛直動のみが対象となっており、計量法においても鉛直振動の感覚補正值のみが規定されている。また、既往の調査によると、振動レベルで比較した場合、水平動よりも鉛直動が卓越していた¹⁾ことから、従来は鉛直動の伝播性状が主に検討対象とされてきた。

しかし、振動伝播メカニズムを検討し地盤振動予測や対策法開発の基礎データとする上では、鉛直動と同時に水平動の伝播特性についても把握する必要があると考えられる。このような観点から、鉛直動および水平2成分の振動レベル値を対象とした詳細測定¹⁾や、水平動を含

む300km/h程度で走行する新幹線沿線地盤振動の測定・分析等の事例^{例えば5)}が報告されている。しかし、車種や列車速度などの地盤振動起振力特性による影響や構造物近傍も含めた詳細な伝播特性などは明らかでない。

本報告では過去に実施した起振機試験結果や、新幹線の高速走行試験等の振動測定結果にもとづき、鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性について述べる。

2. 鉄道総研における既往の調査結果

既往の調査データ¹⁾にもとづき、新幹線のラーメン高架橋区間において、200～240km/h程度の速度で走行する新幹線から生じる鉄道振動を対象に、軌道中心から約10m(構造中心から12.5m)および約23m(構造中心から25m)点の地盤の鉛直動のスペクトルを橋脚近傍地盤の鉛直動のスペクトルで正規化した結果を図1に示す。なお、図1は東海道・山陽・東北の各新幹線沿線の計13箇所の測定結果の平均である。

この図より10m点のスペクトルに着目すると、おおむね8～20Hz前後の周波数帯域の振動はあまり減衰しておらず、6.3Hz以下の低周波数帯域と40Hz以上の高周波数帯域の振動が周波数とともに減衰するため、全体として台形のスペクトルとなっている。一方、23m点のスペクトルは10m点のスペクトルとほぼ平行であり、10m点から23m点の間では周波数によらずほぼ一様に減衰が生じている。

このことから、構造物に近い位置の振動が地盤振動の

* 防災技術研究部 地質研究室

** 防災技術研究部 地震防災研究室

特集：環境技術

伝播性状把握や振動対策を検討する上で重要であることが確認できる。しかし、周波数による鉛直動と水平動の伝播特性の違いなどは明らかでない。また、図1の基礎データ収集時と比べ現在の新幹線の速度は大幅に高くなっていることから、高速走行時の沿線地盤振動の伝播特性について改めて検討する必要があると考えられる。

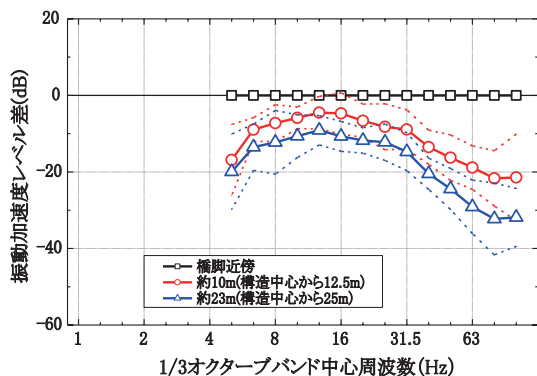


図1 ラーメン高架橋区間における鉛直動の正規化スペクトルの例

(橋脚近傍地盤の鉛直動により正規化。速度200～240km/h程度。実線は13箇所の平均、破線は±1σの範囲を示す)

3. 起振機実験による予備検討

3.1 実験の概要

構造物近傍における地盤振動伝播特性に関する現地試験の予備検討として、過去に鉄道総研構内で実施された起振機試験⁶⁾の結果を再整理した。この実験では高架橋の実物大の基礎(長さ3.5m, 幅3.3m)を設置し、起振機による鉛直加振を実施した。主測線は実高架橋の線路直交方向に対応する方向で、起振機中心から1～10mの範囲では1m間隔、10～20mの範囲では2m間隔、20～29mの範囲では3m間隔に測定点が配置されている。加振周波数は6～40Hzである。

試験箇所付近の地盤は二層構造であり、地表から深さ1.2m程度までがS波速度(Vs)=160m/sの表層で、1.2m以深はVs=400m/s程度の層である。

3.2 実験結果

代表的な周波数における正規化後振動加速度レベルと起振機中心からの距離の関係を図2に示す。ここでは実高架橋での線路直交方向に対応する測線について、起振機中心からの距離1m点の鉛直動で正規化した結果を示す。この図より距離減衰の基本的な傾向をみると、構造物から3m程度までの範囲では減衰が比較的小さいことや、3m程度よりも遠方の地盤ではおおむね距離とともに振動が減衰していく傾向があることがわかる。また、鉛直加振であるにも関わらず加振周波数が12Hzと18Hzの場合には多くの測定点で鉛直動よりも水平動の方が大

きい傾向があるなど、特異な振動伝播を生じる周波数帯域があることが確認できる。

このように、起振機試験結果の再整理により、単一の橋脚から生じる振動について基本的な特徴を把握することができた。また、構造物近傍から沿線地盤への地盤振動の伝播特性を把握する上では、特に構造物に近い箇所において水平動を含む地盤振動の伝播特性を詳細に把握する必要があることが確認できた。

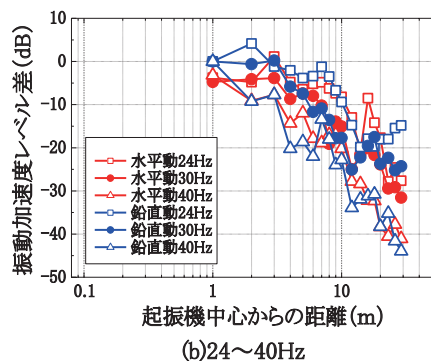
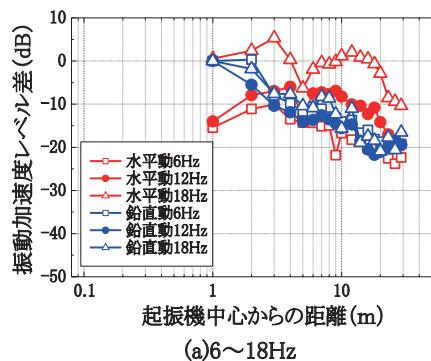


図2 起振機試験時の正規化後振動加速度レベル(各周波数とも1m点の鉛直動により正規化)

4. 現地測定による検討

4.1 測定概要

高速列車が走行する際の地盤振動伝播特性を把握するため、構造物や地盤条件が異なる箇所において現地測定を実施した。測定は主として高速試験列車を対象に列車速度や車両形式による影響を検討するためのケースと、営業列車を対象に距離減衰性状をより詳細に調査するためのケースの2つのパターンを実施した。以下では個々のケースごとに測定で得られた特性について述べる。

4.2 高速走行時の地盤振動特性

測定は桁式高架橋およびラーメン高架橋の各一箇所で行った。軌道はいずれもスラブ軌道である。桁式高架橋の測定点(以下、桁-1測定点)はスパン20mの単純桁が連続する区間で、橋脚は壁式である。また、比較的良好な地盤で基礎は直接基礎(長さ8m, 幅10m)である。一方、ラーメン高架橋の測定点(ラーメン-1測定点)

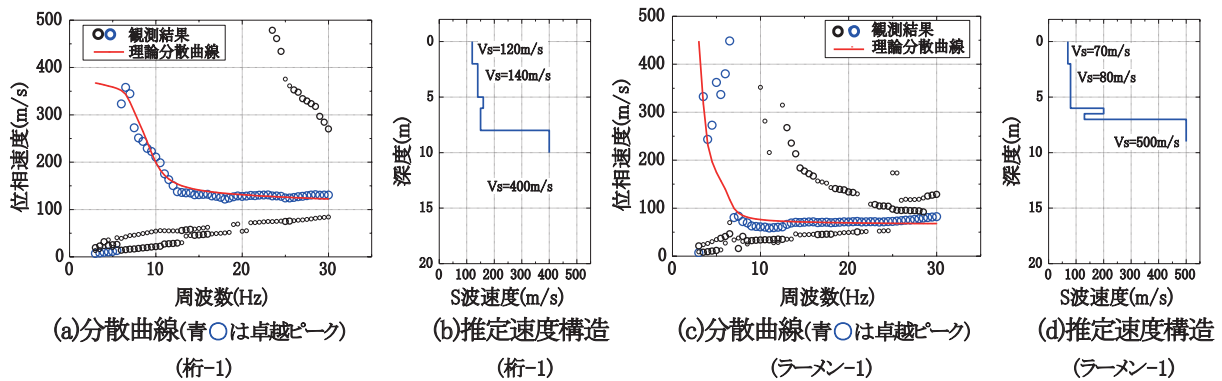


図3 地盤の表面波探査結果

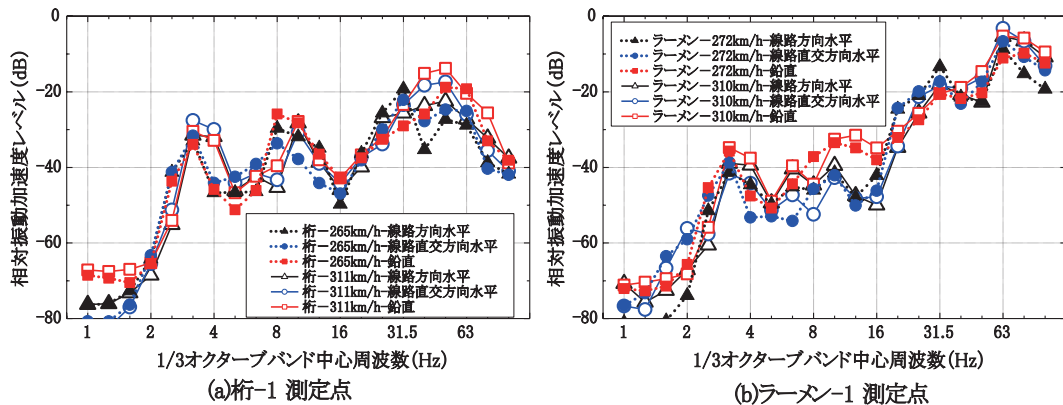


図4 下り橋脚近傍点の振動加速度スペクトル例（新幹線タイプ）
（振動加速度レベル全データの最大値を0dBとして正規化）

はスパン8mの3径間ラーメン高架橋区間で、セット間は10m程度のゲルバー桁となっており、地盤は表層がやや軟弱な地盤で基礎は杭基礎（長さ3.7m、幅10.2m、杭長7m）である。測定対象列車は新幹線タイプと新幹線・在来線直通タイプの2形式の高速試験車で、速度は約160～320km/hである。

測定は橋脚近傍地盤で2点（上り側および下り側各1点）、下り軌道中心からの離れが12.5mの測定点、25mの測定点の4点を基本とした。また桁式高架橋区間では50mの測定点の振動も測定した。測定は下り線を走行する高速試験車を主対象とした。

各測定箇所の地盤条件については表面波探査法⁷⁾により調査した。図3に調査で得られた分散曲線およびS波速度構造推定結果を示す。なお青丸は観測された卓越ピークである。

振動測定は鉛直動および水平動2成分の3成分を対象とした。図4に構造物近傍の測定点における1/3オクターブバンドスペクトルの例を示す。測定結果は、測定された振動加速度レベル全データの最大値を0dBとして正規化した。この図より、いずれの区間においても3.15～4Hz、10Hz、40Hz以上の3つの周波数帯域に主要なピークがあらわれているなど、車両の軸配置および列車速度で決まる基本的な周波数特性は同じであることが確認できる。

速度270km/h前後の場合と310km/h前後の場合を比較すると、ピークのあらわれる周波数は速度とともに高周波側に移動していることや、各周波数帯域のピークの大さきの変化はあまり大きくないなどがわかる。

しかし、10Hz以下の低周波数帯域の振動は桁式高架橋区間の方がやや大きいのに対し、63Hz以上の高周波数帯域の振動はラーメン区間の方が大きいなど、振動加速度レベルの大きさについては構造物や地盤の条件により異なっている。

次に、沿線地盤での各成分の地盤振動スペクトルを下り橋脚近傍点の鉛直動のスペクトルで正規化（以下、正

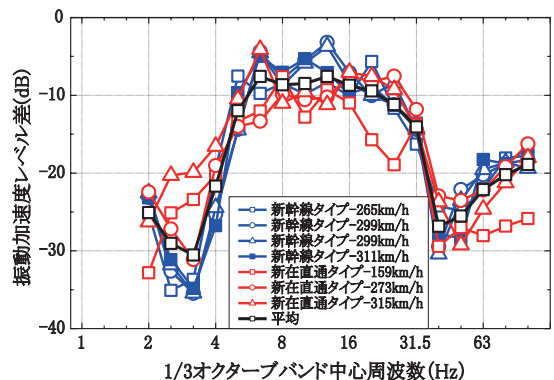


図5 桁-1区間12.5m点における鉛直動の正規化スペクトル（下り側橋脚近傍点の鉛直動により正規化）

特集：環境技術

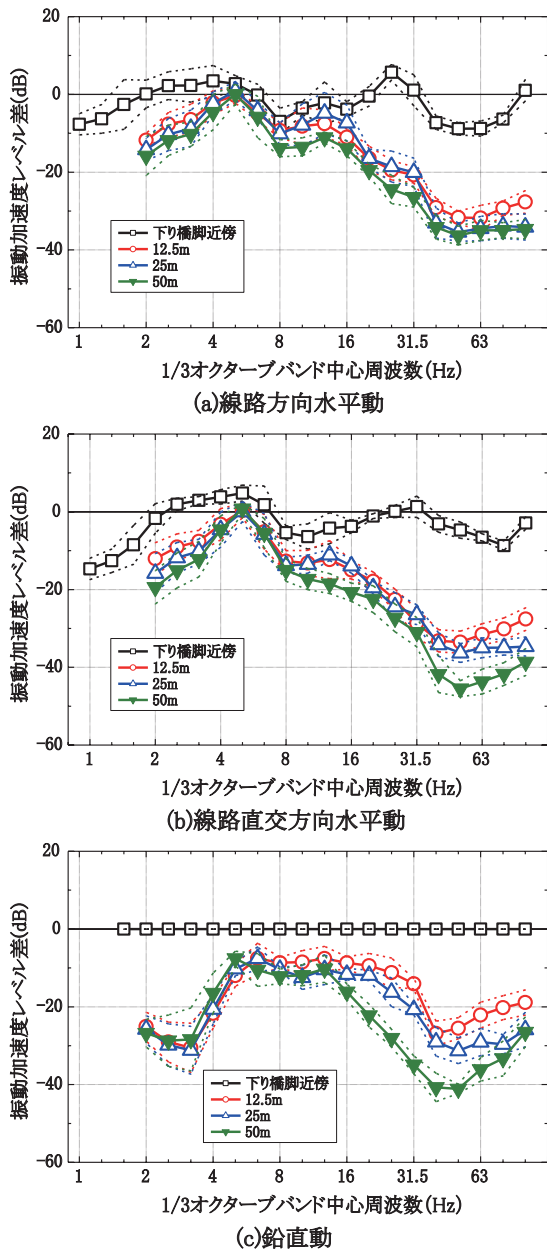


図6 柎-1区間における正規化スペクトル
(下り側橋脚近傍点の鉛直動で正規化)

(実線は各点における平均、破線は $\pm 1\sigma$ の範囲を示す)

(車種：新幹線タイプ・新在直通タイプ、160～320km/h程度)

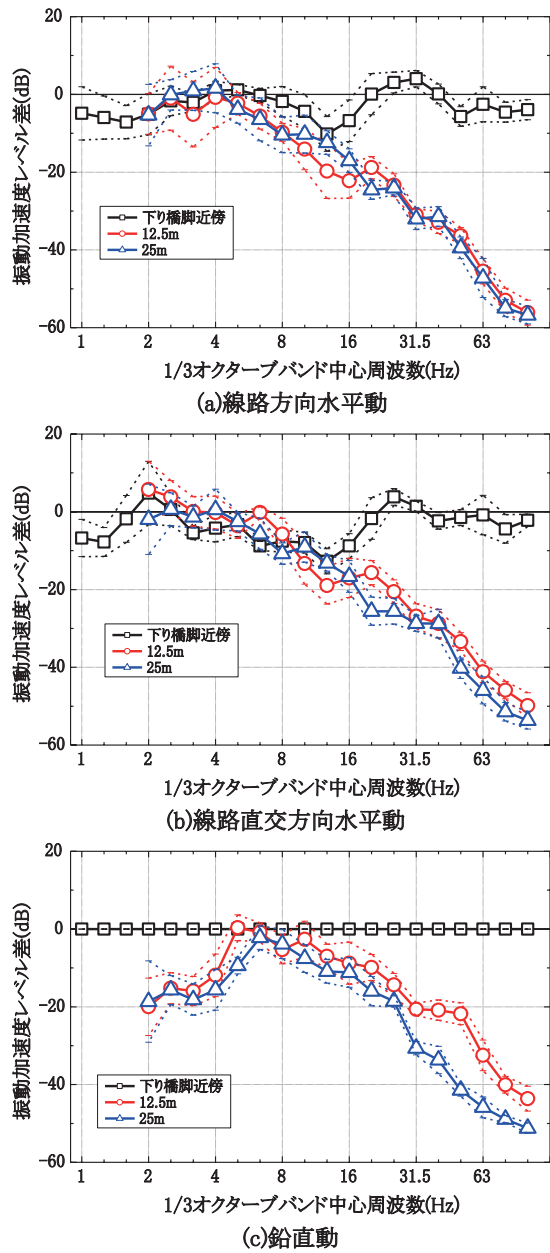


図7 ラーメン-1区間における正規化スペクトル
(下り側橋脚近傍点の鉛直動で正規化)

(実線は各点における平均、破線は $\pm 1\sigma$ の範囲を示す)

(車種：新幹線タイプ・新在直通タイプ、160～320km/h程度)

規化スペクトル) し、構造物近傍地盤の鉛直動に対して沿線地盤振動がどの程度減衰しているかを求めた結果の例を図5に示す。

この図より柎-1測定点の12.5m点における鉛直動の正規化スペクトルを見ると、車軸配置や列車速度が大きく異なる場合についても、正規化後のスペクトルはほぼ一定の形状であることが確認できる。これらの特徴は今回測定した全測定点・測定成分に共通しており、車軸配置や列車速度など地盤振動の起振力特性に関わる要因が、地盤振動の伝播特性に及ぼす影響は今回の測定箇所では

比較的小さいことが確認できた。

このことから、今回の測定の範囲では、高架橋からの地盤振動については列車速度等の影響を考慮しない簡易なモデルにより新幹線沿線地盤振動の伝播特性の予測計算を実施可能と考える。

次に下り橋脚近傍地盤から50m位置までの正規化スペクトルを、柎-1箇所を図6、ラーメン-1箇所を図7に示す。

これらの図より、柎-1、ラーメン-1のいずれの箇所においても、下り橋脚近傍と12.5m位置の振動の差と比べ12.5m位置と25m、50m位置での振動の差の方が小さい

ことがわかる。特に、16Hz以下の帯域では12.5m～50mの正規化スペクトルはおおむね同じ値であることから、この帯域の主要な振動減衰は構造物近傍から12.5mまでの間で生じており、12.5m以遠では減衰量が小さいことがわかる。

このように、300km/hを超える高速列車についても、地盤伝播特性の基本的特徴については、2章で述べた200km/h前後の列車の鉛直動に関する従来の知見とおおむね整合していることがわかった。

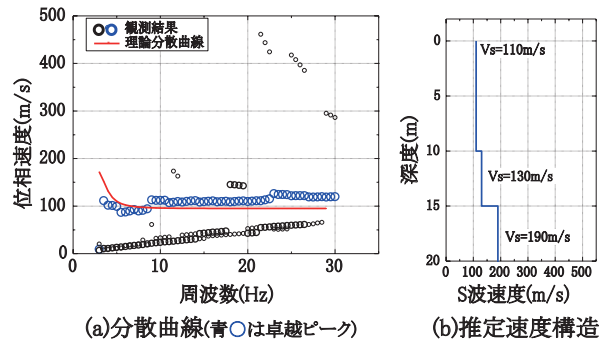


図8 地盤の表面波探査結果（ラーメン-2）

4.3 地盤での振動伝播特性の詳細調査

構造物に比較的近い箇所での振動伝播性状を把握するための測定を実施した。測定箇所は、4.2節で測定した2箇所（桁-1、ラーメン-1）のほか、地盤が非常に軟弱な箇所でも桁・ラーメンの各々について1箇所ずつ（桁-2、ラーメン-2）測定した。

詳細測定にあたっては、3章における検討結果を参考に、構造物近傍～軌道中心からの離れ12.5mまでの間に密に測定点を配置した。測定対象は下り線を走行する営業列車である。

追加測定した2測定地点の概要は以下のとおりである。

- (1) 桁-2：ラーメン橋台、スパン28m、杭基礎、軟弱地盤
- (2) ラーメン-2：ラーメン高架橋（調整桁部）、杭基礎、軟弱地盤

桁-2およびラーメン-2の箇所は、N値10前後ないし

それ以下の層が厚く堆積している。両地点間の距離は400m程度で近いことから、地盤調査はラーメン-2の箇所のみで実施した。表面波探査結果を図8に示す。

50m位置での3成分の正規化スペクトルを図9に示す。この図より、いずれの箇所、成分においても、4～8Hz帯域の減衰が比較的小さく、8Hz以上の帯域では周波数が高くなるとともに減衰が大きくなるなど、正規化スペクトルの基本的な形状は類似していることがわかる。

しかし、例えば鉛直動に着目すると、桁-1の箇所では4～8Hz帯域の振動が10dB程度減衰しているのに対し、ラーメン-2の箇所ではほとんど減衰していない。また、4Hz以下の帯域では桁-1およびラーメン-1の箇所と比較しラーメン-2の箇所での減衰が小さいなど、構造物や地盤による振動伝播特性にはある程度の相違がみられる。

なお、50m位置での水平動と鉛直動の正規化後スペクトルを比較すると、桁-1の箇所においては、5Hz以下の低周波数帯域で水平動の方が鉛直動より大きく、6.3Hz以上の帯域では水平動・鉛直動とも同程度の大きさであった。ラーメン-1の箇所では全体に水平動が鉛直動よりも大きめであるが、特に5Hz以下の低周波数帯域で成分間の差が大きい。また、ラーメン-2の箇所では全周波数帯域で水平動と鉛直動が同程度の大きさである。このように、地盤振動の大きさや距離減衰量等に対しては構造形式や地盤条件の影響が大きい。

次に代表的な周波数帯域の振動について、構造物近傍から50m位置までの距離減衰特性を図10に示す。この図より、いずれの箇所においても水平動・鉛直動の両者とも主要な減衰は基礎端部と地盤の境界部付近（近接側軌道中心から3m程度）からおおむね7m程度（近接側軌道中心から10m程度）の範囲で生じているなど、基本的な特性は周波数や振動成分によらず同様であることがわかる。

周波数帯域や振動成分により減衰量は異なるが、今回測定した範囲では地盤振動の主要な減衰が構造物端部から数m程度の比較的狭い箇所が生じていることがわかった。

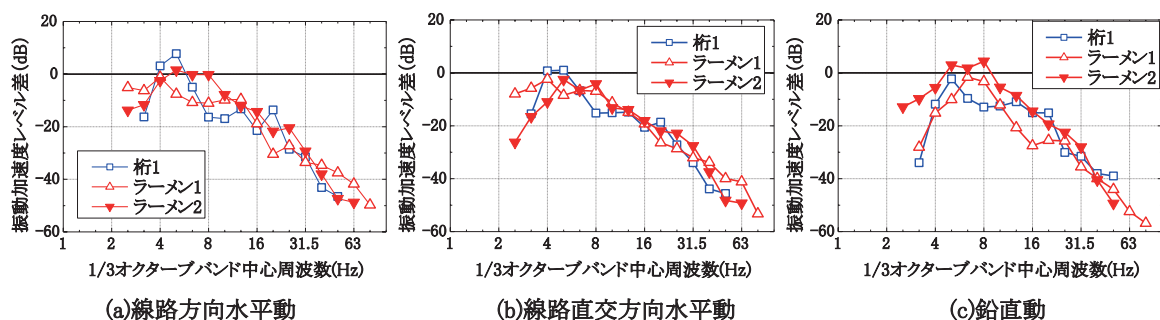


図9 軌道中心から50m位置での正規化スペクトル（下り橋脚近傍点の鉛直動で正規化）

※桁-2箇所50m位置は水田内のため測定点無し

特集：環境技術

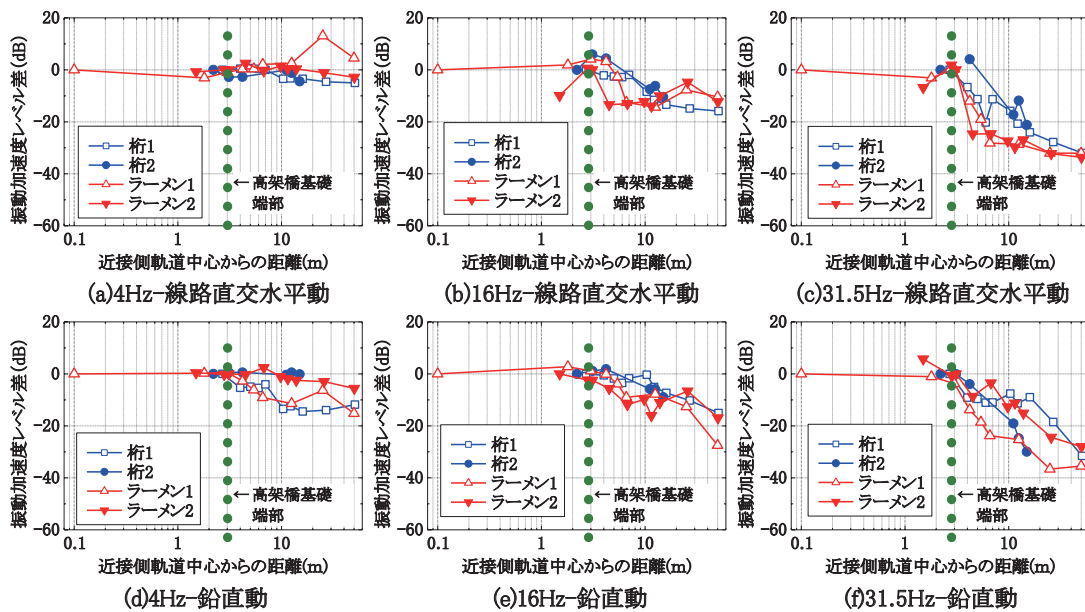


図 10 線路直交方向水平動および鉛直動の距離減衰特性

5. まとめ

新幹線の地盤振動の予測・対策を考える上で、水平動を含めた地盤振動の伝播特性の把握は重要な課題である。そこで、過去に実施した起振機試験結果や新幹線沿線における振動測定結果にもとづき、鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性について検討した。

結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 今回の測定結果では同一位置、同一成分の正規化スペクトルは、列車速度や車軸配置などの地盤振動起振力特性が異なる場合もほぼ同じであり、地盤振動伝播特性に対する起振力特性の影響が小さいことを確認した。
- (2) 鉛直動と水平動のいずれについても地盤振動の減衰は構造物に比較的近い位置で生じていることや、地盤振動の大きさや距離減衰量等に対しては構造形式や地盤条件の影響が大きいことを確認した。
- (3) 今回の測定箇所に類似した構造物・地盤条件については、列車速度等の影響を考慮しない簡易なモデルにより、新幹線沿線地盤振動の伝播特性の概略が計算可能であると考えられる。

なお、他の構造形式（例えば盛土、平地等）や、列車速度が地盤・構造物の波動伝播速度を大幅に超えるような特異なケースについては、今後さらに検討が必要と考える。

謝 辞

現地測定においては、東日本旅客鉄道(株)の関係各位に多大なご協力を頂いた。記して謝意を表します。

文 献

- 1) 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 30，pp.63-73，1999
- 2) 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ンポジウム発表論文集，pp.135-138，2004
- 3) 芦谷公稔，横山秀史，岩田直泰：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
- 4) 横山秀史，芦谷公稔，岩田直泰：新幹線高速走行時の地盤振動特性と速度依存性評価法，鉄道総研報告，Vol.20，No.1，pp.23-28，2006
- 5) 竹宮宏和，山本喬太，浅山剛：新幹線高架軌道からの地盤振動伝播性状，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.123-128，2004
- 6) 吉岡修，芦谷公稔：起振機実験による鋼矢板振動遮断工の防振効果，鉄道総研報告，Vol.4，No.8，pp.51-58，1990
- 7) 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