

## 高速列車走行時の桁式高架橋周辺の地盤振動伝播に関する研究

金田 淳

## 1. 研究の背景と目的

高速鉄道に起因する地盤振動に関しては、1976年3月12日に「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)」(環大特32号)が、環境庁長官から運輸大臣あてに勧告されている。勧告には地表面振動の鉛直成分の指針値が示されており、高速化等を行う場合には指針値を超えないような対処が必要となる。

近年建設された新幹線の場合、杭基礎構造の桁式高架橋周辺で地盤振動に関する指摘が多いことが明らかにされている。<sup>1)</sup>そこで、本研究では研究対象を桁式高架橋周辺の地盤振動とする。

桁式高架橋周辺の地盤振動伝播を明らかにするためには、車両から構造物へ加振力特性と桁、橋脚および地盤の振動特性を明らかにする必要がある。これらのうち、構造物への加振力特性<sup>2)</sup>、桁の振動特性<sup>3)</sup>については既往の研究事例があるが、橋脚と地盤の振動特性に関する研究事例は少なく、特に270km/hを超える高速域での橋脚と地盤の振動の関係については明らかにされていない。

そこで、本研究では、橋脚と地盤の振動に着目し、第一の目的を桁式高架橋の橋脚振動から、周辺地盤の振動を計算する手法を提案することとした。はじめに列車通過時の橋脚と周辺地盤の地盤の振動加速度測定を行い、高速列車走行時の橋脚挙動と橋脚から地盤への振動伝播特性を明らかにする。次に、測定によって得られた橋脚の主要な挙動の考慮した地盤振動計算モデルを提案する。さらに、橋脚および地盤の加速測定結果に基づき、提案した地盤振動計算モデルの精度を検証した。

また、列車の高速化に伴い周辺地盤振動の増加が想定される場合には振動低減対策の実施が必要となる。本研究では高架橋直下の地盤において橋脚基礎の機能を阻害することなく実施可能な対策工法として、地盤振動対策工の中でも最も代表的な地中防振壁(以下、防振壁と記す。)に着目する。鉄道事業者が防振壁による振動低減対策を実施する場合、防振壁の設置が容易となるのは鉄道用地内となる。その場合、図1に示す通り、橋脚

に極めて近接した位置に防振壁が設置されることとなる。

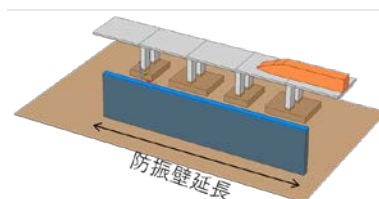


図1 地中防振壁の設置状況

一方で、防振壁の線路方向の長さの設定については自由度が高い。そこで、本研究の第二の目的は、振動対策工として鉄道敷地内において地中防振壁を設置する場合において、その長さが振動低減効果に及ぼす影響の検証とし、縮小模型実験により防振壁長さと振動低減効果の関係を明らかにした。

## 2. 橋脚の振動特性

図2に座標軸の定義と、橋脚の振動モードを示す。

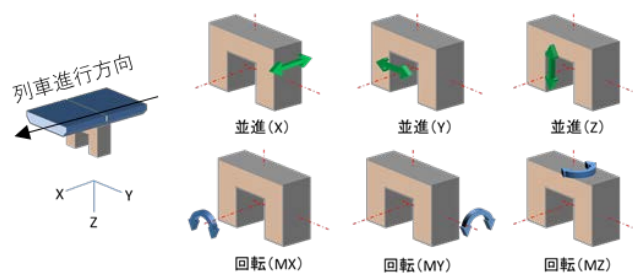


図2 橋脚の振動モード

これらの振動モードのうち列車通過時の卓越する振動モードを振動計測より明らかにする。

橋脚の並進挙動を明らかにするために、地表面近傍部に加速度センサーを取り付け、列車通過時の振動加速度測定を実施した。この計測は表1に示す3地点で実施した。

表1 測定構造物の諸元

地区	桁長	下部構造	杭長
A	15.0m	杭基礎	10~11m
B	15.0m	直接基礎	—
C	25.0m	杭基礎	24m

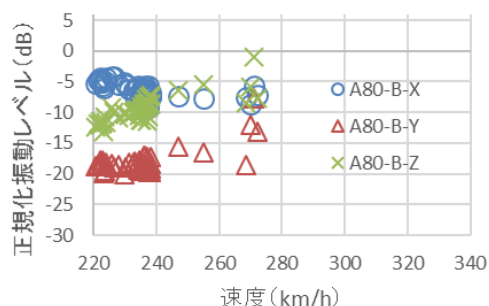


図3 卓越する振動成分

図3はA地区の橋脚での列車速度と正規化振動レベルの関係を示している。なお、ここでの振動レベルは応答が最も大きい振動数での振動レベルを示している。同図からは、並進成分としてはX成分またはZ成分が最大値をとり、Y成分が最大値をとるケースはないことがわかる。

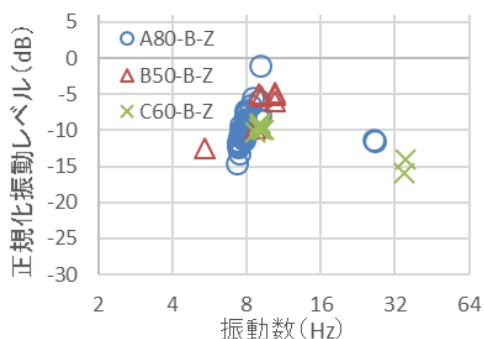


図4 卓越振動数

図4はZ成分に着目し、各地区における、列車毎に最大の振動レベルを示す振動数と当該振動レベルの関係を示したものである。同図からは、地区により、最大振動レベルを示す振動数が異なることがわかる。また、最大振動レベルを示す振動数が離れているケースも確認される。これらの結果は、速度の変化に伴う橋脚振動の変化は、速度の増加に伴い単純に振幅が増加するわけではなく、主要な振動方向や、振幅が卓越する振動数の離散的な変化も伴う複雑なものであることを示している。

### 3. 地盤振動と橋脚振動の関係

橋脚から橋脚周囲の地表面への振動伝播特性を明らかにするために、列車走行時の橋脚と周辺地表面の加速度を測定した。地表面の鉛直振動の振動数特性を図5に示す。同図は、A地区の地盤においては8Hz付近の振動応答が卓越し、同振動数での振動が伝わりやすいことを示している。

続いて、8Hz付近の振動の経時変化に着目し、橋脚の各振動成分と地盤の鉛直応答の相関について重回帰分析により検討する。橋脚振動の各成分

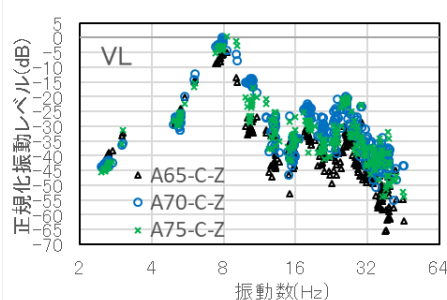


図5 列車通過時の地表面の鉛直振動

を説明変数とし、地盤の鉛直応答を目的変数としている。考慮する橋脚の数と振動成分を変化させ、回帰式の実測値の再現精度を評価した。

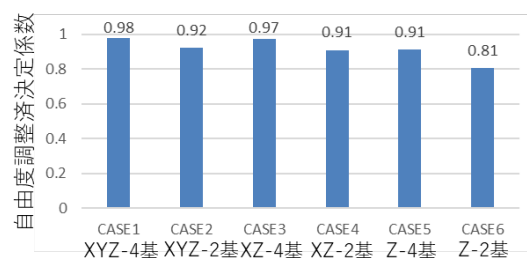


図6 自由度調整済み決定係数

図6に自由度調整済み決定係数を示す。Y成分の有無は決定係数に大きな影響を及ぼしていないことがわかる。考慮する橋脚数が4基の場合、決定係数は大きくなるが、2基の場合との差は約0.06と小さい。これらの結果より、地盤の鉛直振動は、2基の橋脚振動のZ成分とX成分を説明変数とするとおおむね再現できると考えられる。

### 4. 橋脚の回転挙動

これまでの測定結果より、橋脚のX方向の振動が地表面の鉛直振動に影響を及ぼしていることが考えられる。このX方向の振動成分は図7に示すような、橋脚の回転挙動により生じていると想定される。

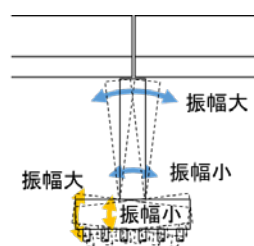


図7 橋脚の回転挙動

そこで、回転挙動の有無を明らかにするため、橋脚の下り線側地表面近傍部の設置した加速度センサーを基準として、鉛直方向および水平方向に離隔を持つように加速度センサーを設置し、列車通過時の加速度を測定した。図8に加速度測定位置を、図9に測定結果を示す。

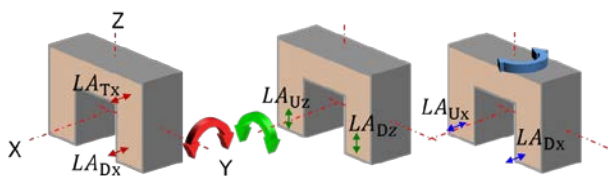


図8 加速度測定位置

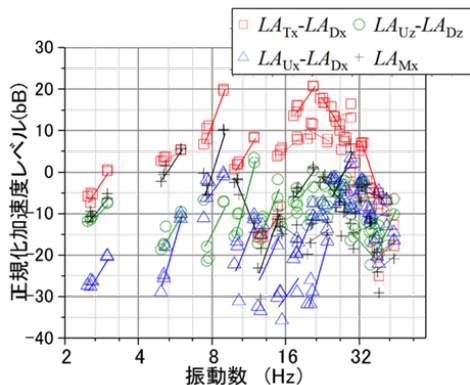


図9 相対加速度

図9からは上下および左右に離隔を持つ加速度センサーの計測値には差が生じているがわかる。つまり、列車通過時の橋脚挙動には回転成分が含まれる。また、橋脚の回転挙動は、Y軸周りの成分が大きく、X軸周りおよびZ軸周りの成分は小さい。

続いて、Y軸周りの回転がフーチング部の挙動に及ぼす影響について検討を行う。橋脚柱部の曲げモーメント分布が高さ方向に一定であると仮定すると、図10に示す上下および左右に離隔を持つ3点(点T、点Dおよび点M)で測定された加速度から得られる柱部の回転角 $\theta_M$ と $\theta_{TD}$ より、橋脚の柱部の変形を曲げ変形成分を分離し、剛体回転成分 $\theta_R$ を分離することができる。

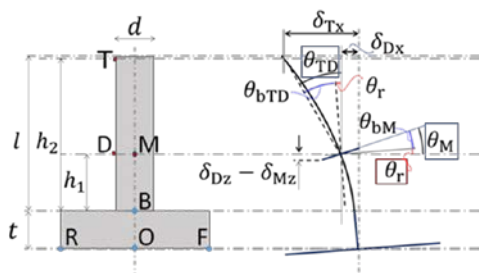


図10 計測により得られる回転角と剛体回転角

橋脚の剛体回転成分に基づき、フーチング下面部の鉛直振動の振幅分布を推定すると、フーチング端部の点Fおよび点Rでの振幅は、同中央部点Mでの振幅に対し0.2倍から5.6倍を示す。同様にフーチング下面点Oでの水平振動の振幅は、地表面近傍部点Mでの振幅に比べ2.9倍から3.9倍となる。したがって、橋脚から地盤に入力される振動として、点Mでの並進成分に起因する振動

とは別に、橋脚の回転挙動の影響による振動を含める必要があると考えられる。

## 5. 地盤振動計算モデル

振動測定の結果、列車通過時の橋脚挙動の主要な成分は、z方向とx方向の並進挙動とy軸まわりの回転挙動であることが明らかになった。したがって、橋脚周辺の地盤振動計算モデルはこれらの橋脚挙動を考慮できるモデルが望ましい。

列車走行に起因して発生する振動により地盤に生じるひずみは微小であるため、地盤は線形粘弾性体として取り扱うことができる。したがって、複数橋脚からの振動伝播を同時に計算する必要はなく、各橋脚からの振動伝播を個別に計算した上で合成する手法を適用することが可能である。

そこで、単一の橋脚から地表面上の着目点に伝播する振動を軸対称FEM<sup>4)</sup>を用いて計算することとした。また、複数橋脚から伝播する振動の合成は、パワー和として計算することとし、位相差による干渉に起因する、振動の過小評価を防ぐこととした。この手法を用いて、振動源として4基の橋脚振動の実測値に基づき地盤の振動を計算した結果と、当該地盤の振動の実測値を比較した結果の一例を図11に示す。

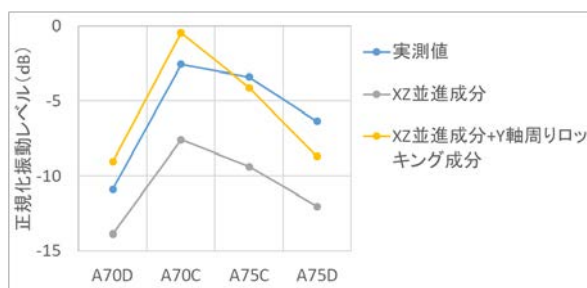


図11 実測値と計算値の比較

同図はA地区の橋脚周辺の4点の地表面(A70D,A70C,A75CおよびA75D)について1Hzから31.5Hzまでの振動数帯域を対象としたオールパス振動レベルを示している。地点の違いによる振動レベルの大小関係について、計算値は実測値を精度よく再現している。橋脚の振動成分として、x方向とz方向の並進成分に加えて、Y軸周りの回転成分を考慮することで、計算値は実測値により近づいていることから、地盤振動計算において、回転成分の考慮が重要であると判断できる。

## 6. 振動対策工の検討

列車通過時の桁式高架橋橋脚および周辺地表面の振動測定とその再現解析結果によると、橋脚周

辺の地表面の振動には複数の橋脚からの振動の影響が及んでいると考えられる。したがって、振動対策工についても、複数の橋脚からの振動伝播を考慮し、橋軸直角方向だけではなく、斜め方向の振動伝播に対する効果の検討が必要となる。

そこで、図 12 に示すように、土槽内に設けた模擬地盤に、防振壁および基礎の模型を配置し、格子状に配置した加速度計により、基礎から周辺地表面への伝播する振動測定を行った。

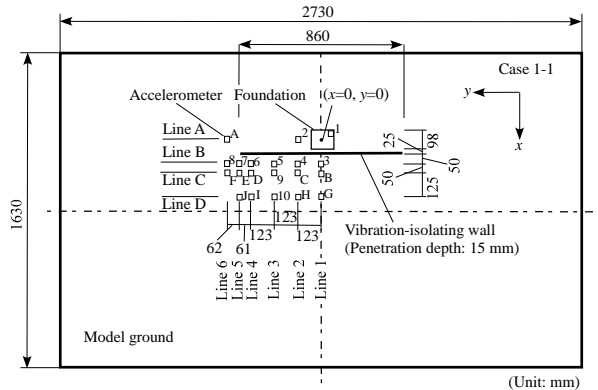


図 12 防振壁と基礎および加速度計の設置平面図

この際、振動源となる基礎の位置を防振壁中心 (Case1-1) から防振壁端部 (Case1-4) に向けて 4 段階で移動させることにより、斜め方向からの振動伝播特性を把握するとともに、防振壁長さが振動低減効果に及ぼす影響を明らかにした。

受振点と防振壁および基礎中心の位置関係に基づき、鉛直振動を付与した基礎模型から受振点に伝播する振動の鉛直成分を整理した結果の一例を図 13 に示す。

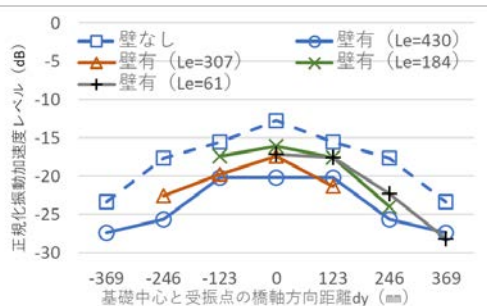


図 13 基礎中心と受振点の橋軸方向距離と正規化振動加速度レベルの関係 (LineC)

同図の縦軸は正規化振動加速度レベルで、基礎の振動を 0dB としている。横軸は、受振点と基礎中心の y 方向 (同図における水平方向) の距離 dy を示している。破線で示す系列は防振壁がない場合の結果である。また、防振壁がある場合の結果は、受振点と防振壁左側端部間の y 方向距離を  $Le$  とし、 $Le$  の値ごとに実線で結ぶ系列として示し

た。振動は  $dy=0$  の場合が最も大きく、 $dy$  の絶対値の増加とともに小さくなる。また、振動低減効果は  $Le$  が短くなるにつれて小さくなる。

図 14 は  $dy=-123,0,123$  となる 3 基の橋脚からの振動を考慮した場合の振動低減効果と防振壁長さの関係を示したものである。

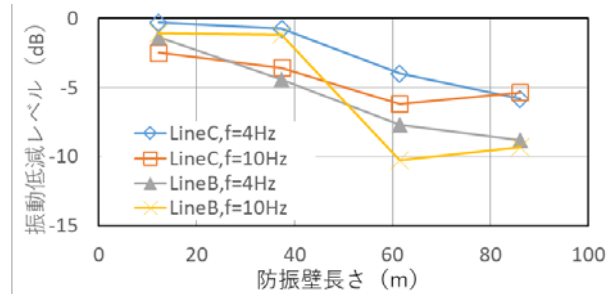


図 14 防振壁長さとの振動低減レベルの関係

同図より、基礎からの離れや加振振動数により傾向が若干異なるものの、防振壁長さの増加に伴い、振動低減効果が増大する傾向が確認できる。防振壁長さとの振動低減効果の関係が明らかとなり、所要の振動低減効果を得るために必要となる防振壁長さを算定することが可能となった。

## 7. まとめ

橋脚および周辺地表面の振動加速度測定を実施し、列車走行に伴う桁式高架橋橋脚の主要な振動挙動は x 方向と z 方向の並進挙動に y 軸周りの回転挙動を加えた 3 種類であることを明らかにした。また、軸対称 FEM を活用した橋脚周辺地盤振動を計算する手法において、前記の 3 種類の橋脚挙動を考慮して地盤への入力振動を設定することにより、精度よく計算できることを確認した。さらに、地盤振動対策工として地中防振壁を線路方向に設置する場合において、複数橋脚からの振動伝播を考慮した場合の防振壁長さとの振動低減効果の関係について、縮小模型実験に明らかにした。

## 参考文献

- 1) 中出千博, 渡邊明之, “実効性の高い地盤振動対策工の設計・施工手法の開発発”. JR EAST Technical Review, no.27, 2009
- 2) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章, “共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究”, 土木学会論文集, No. 724/I-62, pp. 83-102, 2003.
- 3) 吉岡修, “列車の走行による振動の発生機構についての一考察”, 物理探査, Vol.29, No.2, pp.159-169, 1976.
- 4) 吉田一博, 渡辺宏一, 森川和彦, “高架橋上を移動する列車による地盤の応答”, 地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム発表論文集, pp.69-72, 2001.

