

高速鉄道の桁式高架橋走行時による地盤振動の予測

Prediction of ground vibration caused by bullet train passed through viaduct

杉浦 安奈 (地盤環境研究室)

Anna SUGIURA/Geotechnical and Environmental Lab.

Key Words : ground vibration, prediction, attenuation of vibration

1. はじめに

高速鉄道は技術の向上や移動時間の短縮の要請などにより、高速化が求められている。列車速度が増加すると、振動も大きくなるのが既往の研究¹⁾より知られている。そのため、列車が速くなることにより、苦情の無い沿線から苦情が発生することが考えられる。振動は環境アセスメントの重要な評価項目の1つで、列車の高速化による振動の変化を予測することは、必要不可欠なことである。高速鉄道の構造は、主にトンネルと盛土と高架橋に分けられる。江島²⁾はこれらの構造物を高速鉄道が通過した時の地盤振動の計測結果において、高架橋のほうが盛土と比較して、10~50mの測点上の振動レベルは平均で2dB程度大きいことが分かった。また、高架橋はラーメン高架橋と桁式高架橋の2つに分けられる。現在、高速鉄道の振動に対する苦情は桁式高架橋の区間からが多い。現在環境アセスメントで使用される、高速鉄道が高架橋を走行時に発生する地盤振動の予測には、1981年に江島が提案した予測式³⁾が適用される場合がある。当時の走行条件とは異なることから、現時点における同予測式の適用性を調べることを試みた。計測結果と予測値には大きな差異が認められる結果となった。そこで、本研究では桁式高架橋沿線の1地点に着目した。現地計測の結果に基づき、予測式の精度の向上を目指して再検討を行った。

2. 計測の概要と結果

計測は、2012年10月~2014年9月の間、1日の内の計測は午前8時~午後5時まで行った。高架橋の構造は、桁間長が15mの桁式高架橋が単純桁で、基礎は長さ13mの杭基礎である。橋脚の支承は、固定端と可動端が交互に並んでいる。現地の地盤構造は、深さ7mまでN値が5以下の軟弱地盤である。振動計測の計器配置を図-1に示す。高架橋の橋脚に4箇所、地表面は、桁間の中央を通る測線Aに3箇所、桁3の位置から線路直行方向に伸

ばした測線Bに2箇所、それぞれ設置した。図-1中にある地表面の計測地点の距離は、橋脚3からの距離である。対象列車はこの地点を走行する全下り列車である。

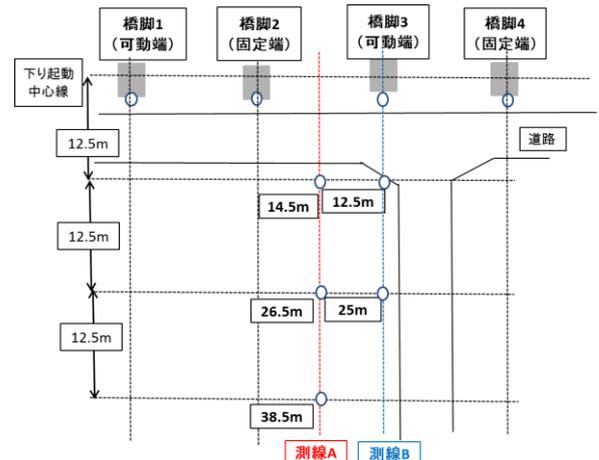


図-1 計器の平面配置図

同一の時刻の列車、同一の速度の計測期間中の1/3オクターブバンドを図-2に示す。1/3オクターブバンドは一部乱れがあるものの、十分に再現性があると言える。また振動レベルは、図-3の様に計測時期による偏りがある。地下水位が最も低いのは2013年3月の-160cmであり、最も高いのは2013年9月の-20cmである。この2か月の振動レベルは大きく差があるが、地下水位が同じ-100cm程度の2012年12月と2013年6月の振動レベルは、平均が5dB程度違う。そのため、地下水位が上昇期になると振動レベルは減少し、下降期になると増加する傾向にあると考える。振動レベルの60%以上が $\pm\sigma$ に収まっているので、概ね正規分布に従っているとみなせる。よって、地下水位による影響はわずかなものと言える。1日の計測時間と振動レベルとの関係で比較を図-4で比較しても、同じ計測日であれば振動レベルは同じ程度にある。標準偏差は1.89dBであった。振動レベル計の基準レスポンスは1dB⁴⁾であり、この編成の標準偏差より0.89dB大きいのが、わずかなものと言える。そのため、季節変動と日変動は考慮しないことにする。

計測の精度は振動レベルから評価した。地表面の振動レベルの標準偏差は最大で2dBであり、振動レベル計の基準レスポンスより1dB程度大きいだけである。よって、計測の精度は十分に高いものと言える。

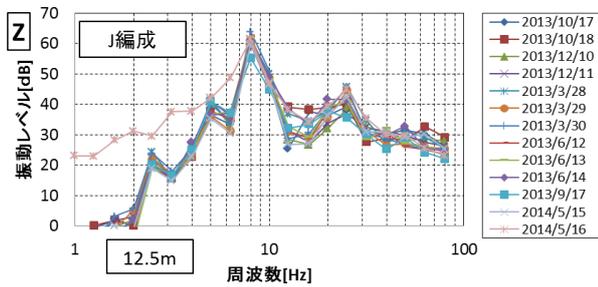


図-2 1/3 オクターブバンドスペクトル形状の再現性

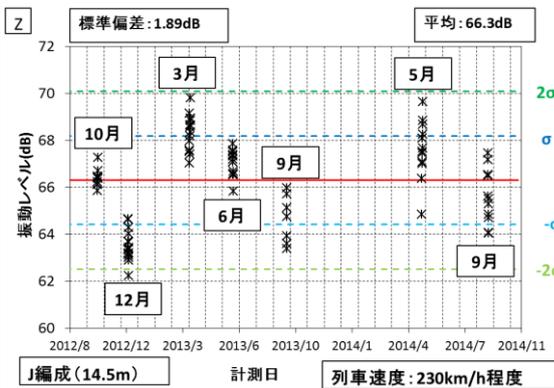


図-3 季節における振動レベルの再現性

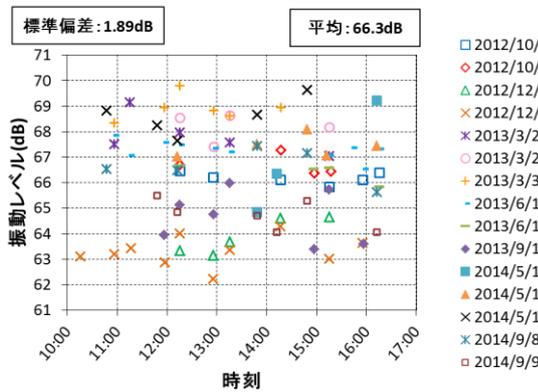


図-4 1日における振動レベルの再現性

3. 既往の予測式と適応性

環境影響評価書³⁾では、高速鉄道の振動予測手法として江島によって提案された次式²⁾のみが紹介されている。

$$Lv(R) = 0.04 \cdot V - 0.364 \cdot X + 60 + \alpha + A_1 \cdot \log(R/10) + A_2 \cdot \log(R - 10) \quad \dots(1)$$

$Lv(R)$: 距離 $R(m)$ の鉛直振動レベル(dB), V : 列車速度(km/h), X : 高架橋のスパン長(m), α : 基礎・地盤条件, $A_1 \log(R/10) + A_2 \log(R-10)$: 距離減衰で, A_1, A_2 は基礎や地盤条件などから決定する質的なスコアである。

この予測式は、1976年に東海道・山陽新幹線沿線にて、10m間隔で計測された839のデータを基に多変量解析によって作成された。当時の計測値と予測値の誤差は標準偏差で±4dBである。

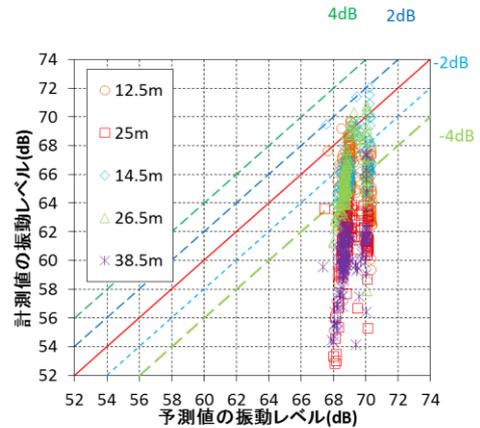


図-5 予測値と計測値の関係

江島式による値と、今回の計測データを対比させた結果が図-5である。予測値は68~70dBに集中している計測値よりも大きい。また68dBに集中する理由は、距離による減衰を評価できていないからだと考える。

4. 振動レベルの減衰式の構築

使用したデータは、季節変動と日変動がないことから2014年5月~9月の計測データを使用した。

14.5mからの減衰量を求めたところ、振動源からの距離が遠くなると振動レベルの減衰量も大きくなっている。しかし、Bomitzの式⁵⁾のように、距離によって一定の値を取っていないことが図-6より分かる。

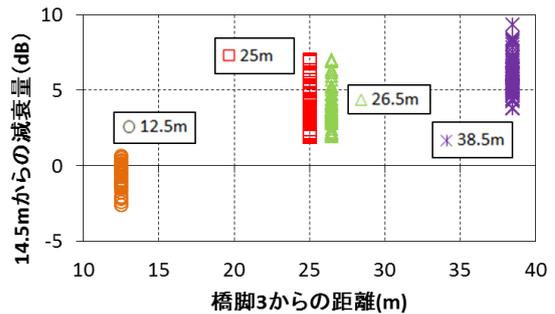


図-6 振動レベルの減衰量

そのため、振動レベルの減衰式を改めて構築する必要がある。今回の計測地点は1地点のみのため、地盤の固さなどの要因は考えられない。列車によって変化するのは列車速度のみであることから、列車速度が振動の減衰に起因していると考えられる。

減衰量 $\Delta L(dB)$ は、基準点からの距離 $R(m)$ と、列車速度 $V(km/h)$ によって表現できると考える。そのため、 R

と V の直線回帰と, Bornitz の式を用いた重回帰分析を行った。仮定した回帰式は以下の3つである。

- $\Delta L = a \cdot R + b \cdot V$
- $\Delta L = 20 \log(R/R_0)^n + \log(e) \alpha (R - R_0) + b \cdot V$
- $\Delta L = 20 \log(R/R_0)^n + \log(e) \alpha (R - R_0) + b \cdot \log(V)$

3つの式を, V を考慮せずに回帰分析を行ったが, V を考慮した場合よりも誤差の標準偏差が大きかった。また, 環境基準の 12.5m 地点の再現性が悪かった。よって, V を考慮して重回帰分析を行う。その結果,

$$\Delta L = 0.25 \cdot R - 0.013 \cdot V \quad \dots(2)$$

の式が最も適当だと判断した。Bornitz の式を用いた回帰式は, 両方とも回帰係数である α が負になった。 α は 0 よりも大きい値なので, 不適切だと判断した。式(2)と計測値の減衰量の振動レベルの関係を図-7 に示す。

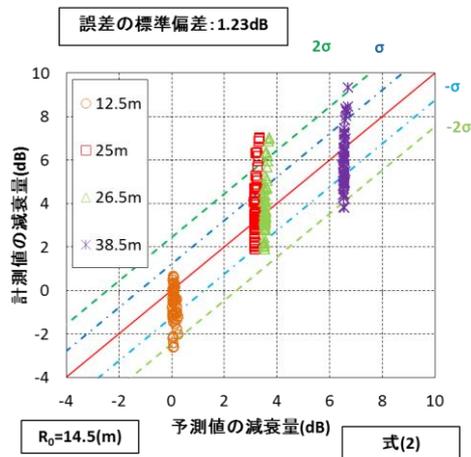


図-7 計測値と式(2)の予測値の減衰量の関係

データは概ね $\pm 2\sigma$ 内に収まっており, 誤差の標準偏差が 1.23dB と小さいことから, 十分な精度だと言える。

5. 予測式の構築

(1) 検討方法

振動予測式は振動レベルが概ね正規分布に従う連続変数であることから重回帰分析を用いて, 2つの方法で予測式を作成した。方法1は, 一般的な振動の予測式と同様に, 振動を予測したい地点の振動を予測する式を作成する方法である。方法2は, 振動源である橋脚の振動を予測し, 減衰をした振動が予測したい地点で複数の橋脚からの振動を合成し, 振動を予測する方法である。この2つの方法で, 予測式の構築を行った。橋脚から入力される振動の要因は列車速度 V(km/h), 1編成の車重 m(t) とし, 減衰は式(2)を使用する。定量的に評価するために, 編成は1編成の車重で扱う。

(2) 方法1

方法1では, V(km/h), m(t), R(m)の3つを被説明変数として重回帰を行った。式は以下ようになった。

$$Lv = 0.0065 \cdot V + 0.0037 \cdot m - 0.30 \cdot R + 66.8 \quad \dots(3)$$

計測値と予測値の振動レベルの関係を図-8 に示す。

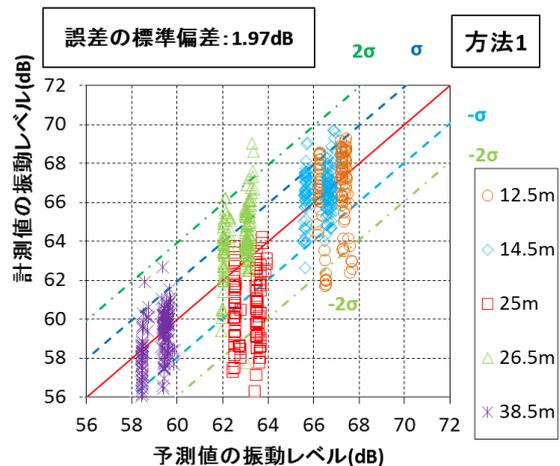


図-8 計測値と方法1の予測値の関係

赤い直線が計測値と予測値が 1:1 の関係にあることを, 青色の破線が $\pm \sigma$ の範囲を, 緑色の破線が $\pm 2\sigma$ の範囲を示している。

25m と 26.5m 地点以外は, 概ね $\pm \sigma$ の範囲にデータが収まっている。25m と 26.5m 地点はいくつかのデータが $\pm 2\sigma$ の範囲から外れているものの, ほとんどは $\pm 2\sigma$ 内に収まっている。しかし, 速度の回帰係数が非常に小さくなったため, 速度の変化による振動レベルの変化が微小なものとなった。列車速度が大半を占める 230(km/h) から現在走行している最高速度である 275(km/h) に増加しても, 約 0.30dB しか増加しないことになる。実際の計測では, 1~2dB 程度の増加がある。

(2) 方法2

方法2では, まず橋脚の振動を予測する式を作成した。高架橋の支承は, 上部構造の回転変位のみを吸収する固定端と, 回転と伸縮を吸収する可動端がある。固定端と可動端で平均の振動レベルが異なることから, 固定端と可動端の橋脚は分けて予測式を作成した。車重の回帰係数は 0 であったため, 式(4)と(5)では無視した。各橋脚の予測式は以下ようになった。

• 固定端

$$Lv_{1b} = 0.085 \cdot V + 43.7 + (0 \cdot m) \quad \dots(4)$$

・可動端

$$Lv_{2b} = 0.024 \cdot V + 54.3 + (0 \cdot m) \quad \dots(5)$$

次に式(2)の減衰式を用いて、振動を予測したい地点の振動を求める。最後に、地表面の振動は複数の橋脚から発せられる振動を受けていると考えるので、振動を合成する。振動レベルの合成は以下の式を用いた。

$$Lv_{ri} = Lv_{1b} - \Delta L \quad \dots(6)$$

$$Lv = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^n 10^{\frac{Lv_{ri}}{10}} \quad \dots(7)$$

また、合成する橋脚の数は、合成する地点を中心に左右 5 本ずつの計 10 本の橋脚とした。図-9 に示す様に、合成された振動レベルがほぼ一定値になるからである。

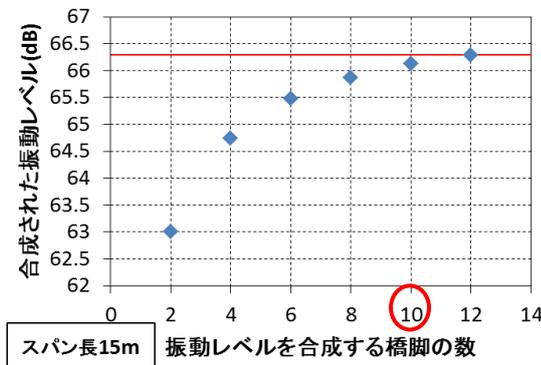


図-9 合成する橋脚の数

以上のことより、計測値と合成し予測した振動レベル(予測値としておく)の関係は図-10 のようになった。

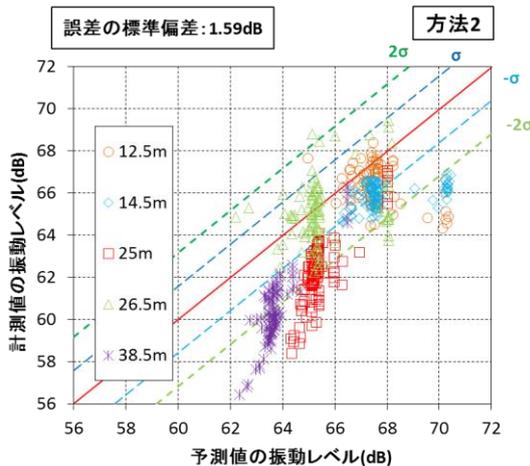


図-10 計測値と方法2の予測値の関係

誤差の標準偏差が 1.59dB と式(3)のものよりは小さいが、ほとんどのデータが赤い線上になく、25m 地点と 38.5m 地点のデータの多くが±2σ内に収まっていない。予測値が計測値よりも下回っており、過大評価している。今回方法2では、全ての橋脚から最大値の振動が加振さ

れたと仮定している。実際は時定数による振動レベルの減衰があり、合成される振動レベルはこれよりも小さくなると考える。このことを考慮していなかったため、予測値は過大評価したと考える。

(3) 評価

方法1と方法2では、誤差の標準偏差は大きな差はない。また、現在使われている江島の式よりも、高い精度で振動を予測できた。しかし、方法1は振動レベルを過小評価しており、方法2は、過大評価気味である。実際に列車速度の増加などにより振動レベルの予測をする際、振動レベルを過小に予測してしまうより、過大評価して振動対策を行う方が、振動問題を未然に防げる。方法2は、時定数による振動レベルの減衰を考慮することにより、より精度の高い予測式にすることができる。これらのことより、方法2の方が、高速鉄道が高架橋を走行する際に発生する地盤振動の予測式として適切である。

6. 結論

本研究で以下の知見を得た。

- 1) 高速鉄道が高架橋を走行する際に発生する地盤振動の減衰量は、振動源からの距離だけでなく列車速度にも依存している。
- 2) 新しい予測式の構築は、振動源である橋脚の振動を予測し、そこから予測地点まで減衰をさせて、必要な本数の橋脚からの振動を合成するという方法による予測をする方が高い精度のものができる。

今後は複数の地点のデータを用いて、予測式をより普遍性の高いものにしていく。

7. 参考文献

- 1) 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，pp.23～28，2006。
- 2) 江島敦：地盤振動と対策—基礎・法令から交通・建設振動まで—，集分社，pp.147，1976
- 3) 江島敦：新幹線鉄道の桁式高架橋における地盤振動対策のための基礎的研究，鉄道技術研究報告，No.1192，pp.49～90，1981。
- 4) JIS C 1510-1995 (振動レベル計)，日本工業規格。
- 5) Bomitz.G：Über die Ausbreitung in von Grosskolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe，J.Springer(Berlin)，1931。