

## 高速鉄道が高架橋走行時に発生する地盤振動の減衰

中央大学大学院 学生会員 ○杉浦 安奈  
 中央大学研究開発機構 正会員 石井 武司  
 中央大学 正会員 齋藤 邦夫

### 1. はじめに

高架橋を高速鉄道が走行した際に発生した振動が地盤を伝わる時、振動源は橋脚であり、その振動は点加振によるものと見なすことができる。地盤における振動の減衰は、一般的に Bornitz<sup>1)</sup> による半無限弾性地盤に点加振が鉛直方向に作用したときの減衰式が用いられる。その減衰量は振動源からの距離のみに依存するとして評価される。本研究で計測を行ったところ、列車振動の減衰量は同一の地点であっても、10dB 以上のばらつきがあった。そこで、高速鉄道走行時の距離による振動の減衰式を、線形近似及び半無限弾性地盤に点加振が鉛直方向に作用したときの減衰式を基にした式を回帰分析するという 2 つの方法によって、より実現に近い減衰式を検討した。

### 2. 高速鉄道の振動における振動レベルの減衰量

環境アセスメントにおいては、高速鉄道が高架橋を走行する際に発生する地盤振動の簡便な次の予測式<sup>2)</sup>を適用することが多い。

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

ただし、 $Lv(R)$  : 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),  $\alpha$  : 基礎・地盤条件,  $A_1 \cdot \log(R/10) + A_2 \cdot \log(R-10)$  : 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。距離減衰量は最後の 2 項で評価される。これは振動源からの距離のみに依存する式となっている。距離減衰量の評価式は、半無限弾性体地盤に点加振が鉛直方向に作用したときの減衰量の式と同様である。高速鉄道が走行時の地盤振動をより正確に予測するためには、振動の減衰部分を精度よく予測できる式を構築する必要がある。

### 3. 計測地点の地盤と計器の配置図

桁間 15m の桁式高架橋が連続する平地で計測を実施した。現地の地盤構造を図-1 に示す。深さ 7m まで N 値が 5 以下の軟弱地盤である。高架橋の基礎は長さ 12m の杭で支持されている。

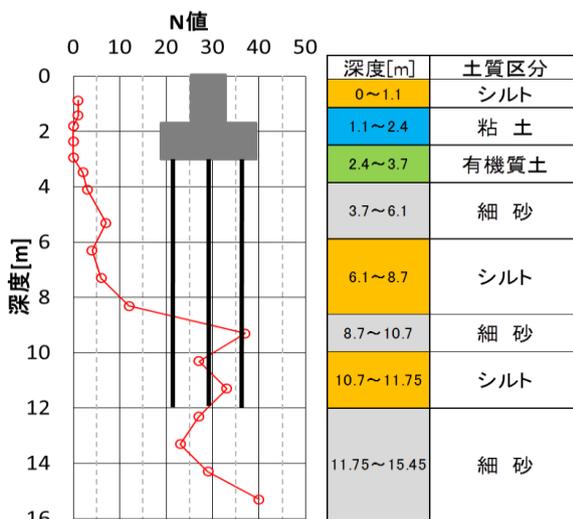


図-1 計測地点の N 値と土質区分

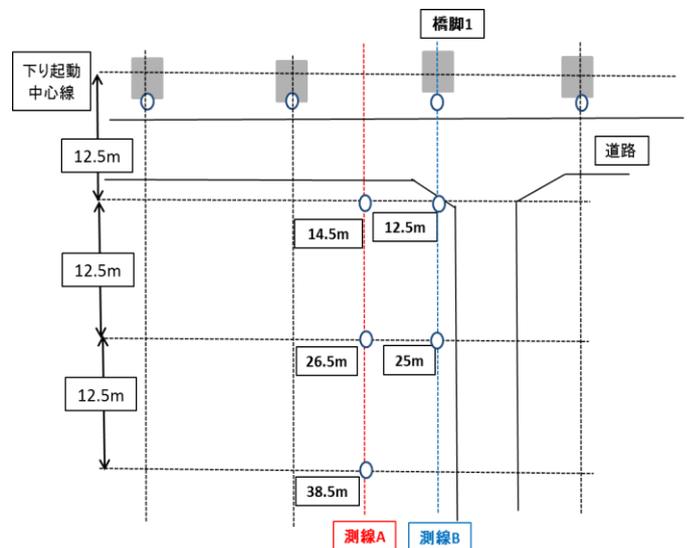


図-2 計器の平面配置図

振動計測の計器配置を図-2に示す。高架橋の橋脚に1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。走行列車によって起振された振動は桁を經由して地盤へ入力される。そこで5つの計測地点に共通する最寄りの橋脚として、図中の橋脚1へ着目する。地表面の計測地点の距離は、橋脚1からの距離である。

4.半無限弾性地盤に点加振が鉛直方向に作用したときの距離減衰の式

Bornitzによる半無限弾性地盤に点加振が鉛直方向に作用したときの振幅を求める式を加速度に変換し、振動レベルで表したものは以下の通りである。

$$\Delta L = 20 \cdot \log(R/R_0)^n + \log(e) \cdot \alpha \cdot (R - R_0) \dots (1)$$

ただし、 $\Delta L$ ：振動レベルの減衰量(dB)， $R$ ：振動源から予測地点までの距離(m)， $R_0$ ：振動源から基準点までの距離(m)， $n$ ：幾何減衰定数， $e$ ：ネイピア数， $\alpha$ ：内部減衰定数である。 $20 \cdot \log(R/R_0)^n$ は距離による減衰を， $\log(e) \cdot \alpha \cdot (R - R_0)$ は土質による減衰を表している。地盤を伝わる振動の67%は表面波<sup>3)</sup>であることから， $n=0.5$ <sup>4)</sup>とした。また，地表面の地質はシルト層であることから， $\alpha=0.03$ <sup>4)</sup>とする。 $R_0$ は計測値の振動レベルのばらつきが最も小さい12.5mとした。

式(1)による振動減衰量と，計測値の減衰量の関係

を図-3に示す。黄色い四角のマークが式(1)の値であり，それ以外は計測した減衰量を表している。12.5mや14.5m地点の振動レベルは，橋脚1の振動レベルよりも大きい値となった。これは，複数の橋脚の振動が合成されているためと考える。よって，12.5mと14.5m地点の減衰量は負の値となっている。橋脚から離れると，振動レベルの減衰量が増加する傾向は，式(1)と計測値とも変わらない。しかし，計測値の減衰量はばらついており，そのばらつきは最大で26.5m地点の10.8dBである。地表面での振動レベルのばらつきは，2dB<sup>5)</sup>程度である。この値よりも5倍も大きいことから，このばらつきは計測の誤差だけではない。このことから，高速鉄道の振動レベルの減衰は距離による一定のものではなく，距離以外の要因もあると考えられる。

5.計測値の減衰量の関係

高速鉄道の振動レベルの減衰要因は，まず式(1)にもある通り，振動源からの距離である。その他として考えられるものは，列車速度，地盤の固さ(N値)などが挙げられる。今回の計測地点は1地点のみの計測であり，また広範囲のものではないので，地盤は均質なものと考えられる。そのため，地盤の固さによる振動レベルの減衰量のばらつきは考慮しない。次に列車速度と振動レベルの減衰量の関係を図-4に示す。黄色い四角が式(1)の値を示しており，それ以外は各地点の計測値の振動レベルの減衰量を示している。ただし式(1)の列車速度は，計測したすべての列車の速度の平均値を用いた。図-4

より，振動レベルの減衰量は振動レベルの減衰量ほどの速度でも一定ではなく，12.5m地点を除き，列車速度が増加すると減衰量は減少するという傾向にある。反対に，12.5m地点は列車速度が増加すると，振動レベルの減衰量も増加する傾向にある。以上より，列車速度は振動レベルの減衰量に関係していると言える。これは列車速度Vを $\log(V)$ に変換しても，図-5より同様のことが言える。

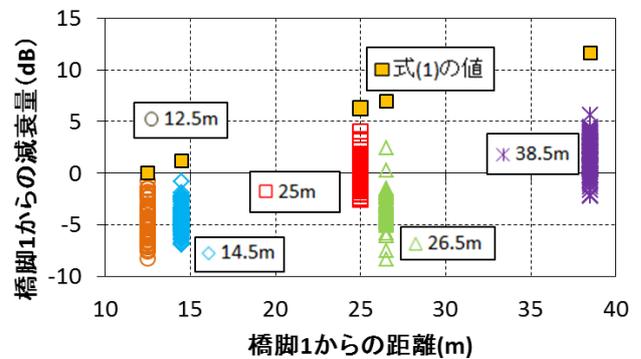


図-3 式(1)と計測値の減衰量の関係 (白抜きのマークが計測値である)

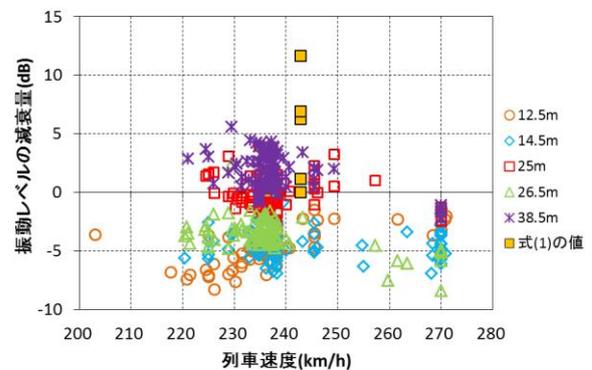


図-4 列車速度と減衰量の関係 (白抜きのマークが計測値である)

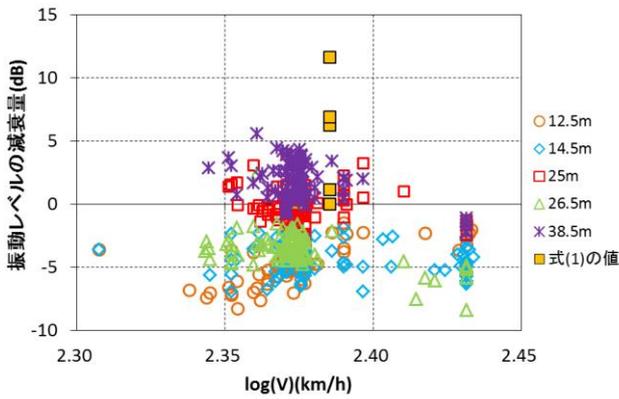


図-5 log(V)と減衰量の関係

(白抜きのマーカーが計測値である)

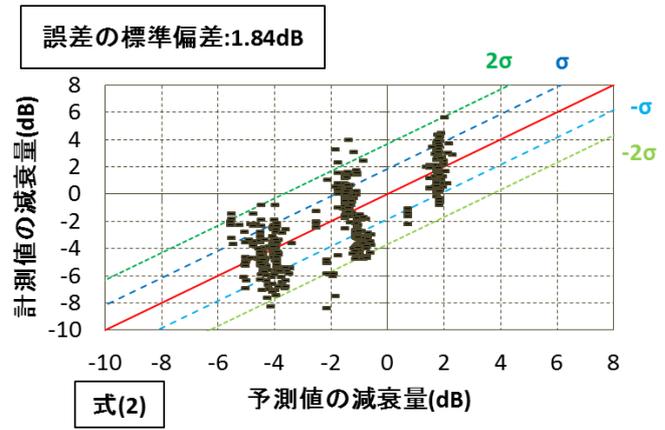


図-6 計測値と式(2)の予測値の減衰量の関係

6.直線回帰による検討

列車速度を V(km/h)とし、振動レベルの減衰量を  $\Delta L=a \cdot R+b \cdot V$  の式と仮定をして、回帰分析を行った結果、式は以下のようになった。

$$\Delta L = 0.23 \cdot R - 0.032 \cdot V \dots (2)$$

予測式は、振動源からの距離が遠くなると振動レベルの減衰量が増加すること、列車速度が増加すると減衰量は減少する式であり、実現象を表している。

計測値と予測値の振動レベルの減衰量の関係を、図-6に示す。赤い直線が計測値と予測値が 1:1 の関係にあることを示し、青色の破線が  $\pm \sigma$  を、緑色の破線が  $\pm 2 \sigma$  の範囲を示している。誤差の標準偏差 ( $\sigma$ ) は 1.84dB である。予測値は概ね  $\pm 2 \sigma$  以内に収まっている。

7.Bornitz の式による検討

Bornitz の式(1)を基にした式の検討を行った。回帰式は、次の 2 式である。

$$\Delta L = 20 \cdot \log(R)^n + \log(e) \cdot \alpha \cdot R + b \cdot V \dots (3)$$

$$\Delta L = 20 \cdot \log(R)^n + \log(e) \cdot \alpha \cdot R + b \cdot \log(V) \dots (4)$$

基準点である  $R_0$  は振動源の橋脚としたため  $R_0=0(m)$  となる。また、列車速度 V を  $\log(V)$  の項にして検討した理由としては、振動レベルの減衰量は「人間の感覚量は刺激量の対数に比例する」という、ウェーバー・フェヒナーの法則に対応すると考えたからである。回帰分析の結果は以下のようになった。

$$\Delta L = -0.20 \cdot 20 \cdot \log(R) + 0.036 \cdot \log(e) \cdot R - 0.0079 \cdot V - 2.22 \dots (3)$$

$$\Delta L = -0.20 \cdot 20 \cdot \log(R) + 0.036 \cdot \log(e) \cdot R - 3.72 \cdot \log(V) + 4.72 \dots (4)$$

式(3)と式(4)で、 $20 \cdot \log(R)$  と  $\log(e) \cdot R$  の係数は同じ値である。速度の回帰係数は、どちらも負であり、列車速度が増加すると振動レベルの減衰量が減少するというを表している。

次に、計測値と式(3)と式(4)の予測値の関係を図-7 と図-8 に示す。式(3)と式(4)で、誤差の標準偏差は 1.81dB と変わらない。しかし、計測値と式(3)の予測値の関係を表した図-7 は、予測値の多くが  $\pm 2 \sigma$  から外れている。一方、図-8 はほとんどの予測値が  $\pm 2 \sigma$  の範囲に収まっている。しかし、予測値が複数の値に集中し、縦に連なっている。

予測値と計測値のデータが概ね  $\pm 2 \sigma$  に収まっている、式(2)と式(4)の予測値の関係を図-9 に示す。誤差の標準偏差は 0.31dB であり、また値の大半が 1:1 の線上にあることから、式(2)と式(4)の予測値は、ほとんど変わらないことが言える。しかし、計測値と式(2)の減衰量の関係を示した図-6 の方は、図-7 のように予測値の減衰量が複数のある値の振動レベルに集中していない。また、データが式(4)は  $20 \cdot \log(R)$  の回帰係数である n が負となっている。基にした式である式(1)の n は 0.5~2 の範囲であり、0 以下にはならない。実現象として考えても、点加振による振動の振動レベルは距離が遠くなると増加することはない。このことを鑑みると、式(4)の  $20 \cdot \log(R)$  の回帰係数が負になることは不適切である。よって、高速鉄道の振動レベルの減衰式としては、

式(2)のほうが適切である。

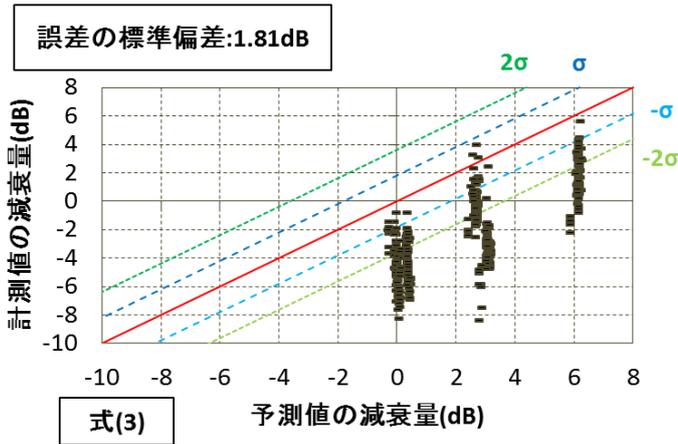


図-7 計測値と式(3)の予測値の関係

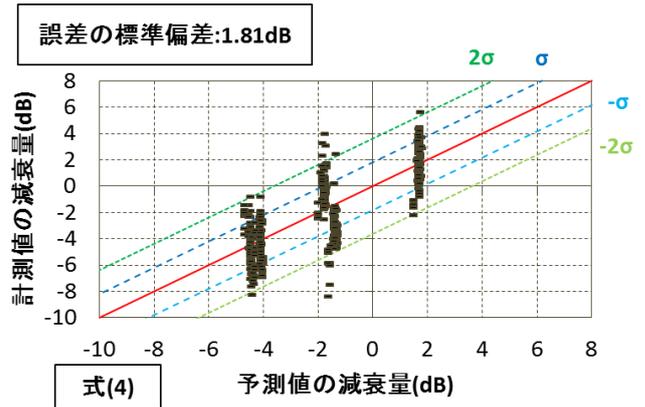


図-8 計測値と式(4)の予測値の関係

### 8.結論

本研究で以下のことが分かった。

- 1)高架橋を走行する高速鉄道の地盤を伝わる振動は、半無限弾性地盤に点加振が鉛直方向に作用したときの減衰式のように距離のみに依存した一定の値をとらない。
- 2)振動レベルの減衰量は、振動源からの距離だけでなく、列車速度にも関係がある。
- 3)振動レベルの減衰式は振動源からの距離と、列車速度を直線回帰すると、再現性が高いものとなった。

今後はこの結果を用いて、再現性の高い、高速鉄道が高架橋を走行する場合の地盤振動も予測式を構築していく。

最後に研究を通して東日本旅客鉄道の金田淳様、池本宏文様、高崎秀明様に多大なる協力をしていただいた。ここに記して謝意を表す。

### 9.参考文献

- 1) Bornitz.G : Über die Ausbreitung in von Grosskolbenmaschinen erzeugten Bodenschwingungen in die Tiefe, J.Springer(Berlin), 1931
- 2) 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.
- 3) G.F.Miller and H.Pursey : On the Partition of Energy between Elastic Waves in a Semi-Infinite Solid, Proceedings of the Royal Society(London), A, vol.233, No.1192, 1955
- 4) 子安勝: 騒音・振動 (下), コロナ社, pp.185, 1982.
- 5) 杉浦安奈: 高架橋を走行する列車における振動の変動幅, 第11回地盤工学会関東支部発表会, 2014.

本研究は、中央大学特定課題研究費の保障を受けて行っています。

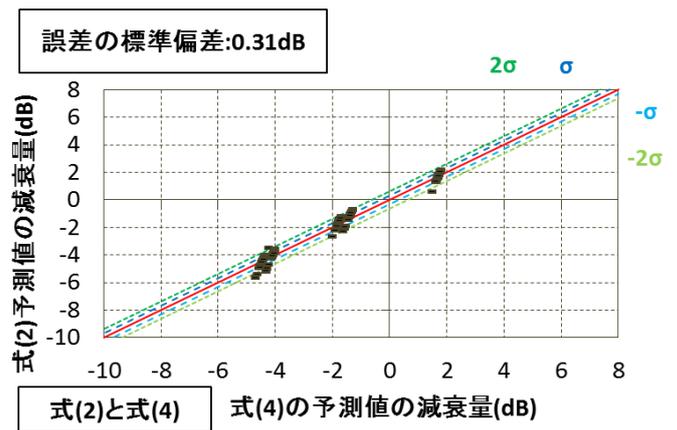


図-9 式(2)と式(4)の予測値の関係