

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

列車走行にともなって沿線に生じる振動を予測する

列車走行にともなって沿線に生じる振動（以下、鉄道振動と呼びます）は、車両による荷重が移動することやレールの凹凸や軌道不整などで車両が揺れることにより発生する振動で、場合によっては環境問題となることがあります。鉄道振動は、新線の建設や既設線の大規模改良、新車両の導入などの際に変化する場合があるため、鉄道沿線の環境を維持する目的で事前の予測が行われてきました。ここでは、実務で使用されているものを中心に鉄道振動の主な予測手法を紹介します。



野寄 真徳
Masanori Noyori
防災技術研究部
地質研究室
研究員
【専門分野】鉄道振動



横山 秀史
Hidefumi Yokoyama
防災技術研究部
地質研究室
主任研究員（上級）
【専門分野】鉄道振動

はじめに

列車が走行すると車両や乗客の重量、車両の振動が軌道を介して地盤に伝わり沿線の地盤が振動します。この振動は鉄道振動と呼ばれます。振動を完全になくすことはできませんので、どのように沿線の環境への影響を抑えるかが課題となります。そのため、鉄道沿線における環境の維持を目的として、事前の予測が行われることがあります。

鉄道振動の予測手法は、実測データを基にした方法や解析による方法などがあり、目的や予測を行う箇所の条件に応じて使い分けられています。

鉄道振動の予測手法の分類¹⁾

鉄道振動を事前に予測するためには、実測記録に基づく振動予測値の統計図表や式、列車の車種や列車速度、構造物の形式、地盤条件が予測したい箇所と類似する箇所（以下、類似箇所）での測定記録、シミュレーション解析などがが必要です。以下では、4種類の予測手法を紹介します（表1）。

①過去の統計データなどに基づく予測手法

振動レベル（※参照）と各種要因（列車速度・軌道形式・構造物形式・地盤条件など）の関係を統計的に図表や式としてまとめ、それを利用する手法

表1 鉄道振動予測手法の種類

鉄道振動の予測手法		予測に必要なもの
①過去の統計データなどに基づく予測手法		統計図表や式
②類似箇所の測定結果をそのまま使用する予測手法		類似箇所での測定
③類似箇所の測定結果と別の手法の組み合わせによる予測手法	③-1 類似箇所と予測箇所の測定結果の組み合わせ	類似箇所での測定結果と予測箇所での測定結果
	③-2 類似箇所の測定結果と理論式の組み合わせ	類似箇所での測定結果と理論式（距離減衰式など）
	③-3 等価起振力法	類似箇所の測定結果と数値シミュレーション
④解析のみによる予測手法		数値シミュレーション

(図1)です。この手法の代表的な例として、帝都高速度交通営団（現東京地下鉄）によるトンネル上の地表面の振動レベル予測式²⁾があります。

この手法は従来から比較的多く使われてきた手法ですが、実際にこの手法を用いる場合、多くの現地測定データが必要となります。また、現地測定をした箇所と車両や構造物、地盤などの条件が大きく違う場合には、そのまま適用することができません。

②類似箇所の測定結果をそのまま使用する予測手法

予測箇所と車両の種類や列車速度・構造物・地盤などが似ている場合に、類似箇所の測定結果をそのまま予測値として扱う手法です(図2)。

この手法は一見簡単そうに思えますが、どの程度似ていれば類似箇所として扱えるかの目安がないため、類似箇所の選定が難しいという問題点があります。

③類似箇所の測定結果と別の手法の組み合わせによる予測手法

この手法は3つに分けられます。1つは、類似箇所と予測箇所の測定結果の組み合わせによる手法(図3左)です。この手法も②の手法と同様に、予測箇所と車両の種類や列車速度・構造物・地盤などが似ている場合に用いら

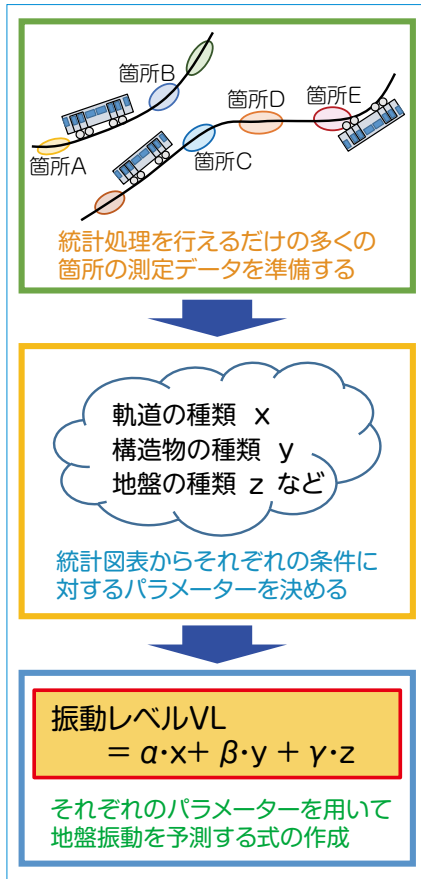


図1 「①過去の統計データなどに基づく予測手法」のイメージ

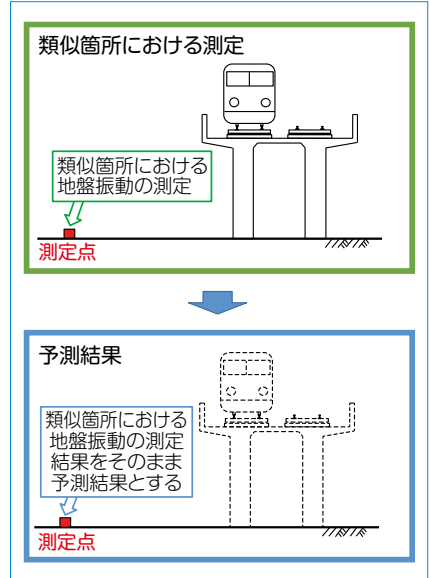


図2 「②類似箇所の測定結果をそのまま使用する予測手法」のイメージ

振動レベル

環境振動で評価に用いられる指標で、振動加速度レベルに人の振動の感じ方による補正を加えたものです。振動レベルは、以下の式で与えられます。

$$VL = 20\log_{10} (a/a_0)$$

ここで、aは観測された加速度に人体の感覚に合わせた補正を加えた値、a₀は基準の加速度（環境振動では、10⁻⁵m/s²）を示します。

人の振動の感じ方は、周波数や振動の継続時間が関係するため、振動レベルは周波数や振動の継続時間による補正を含んでいます。

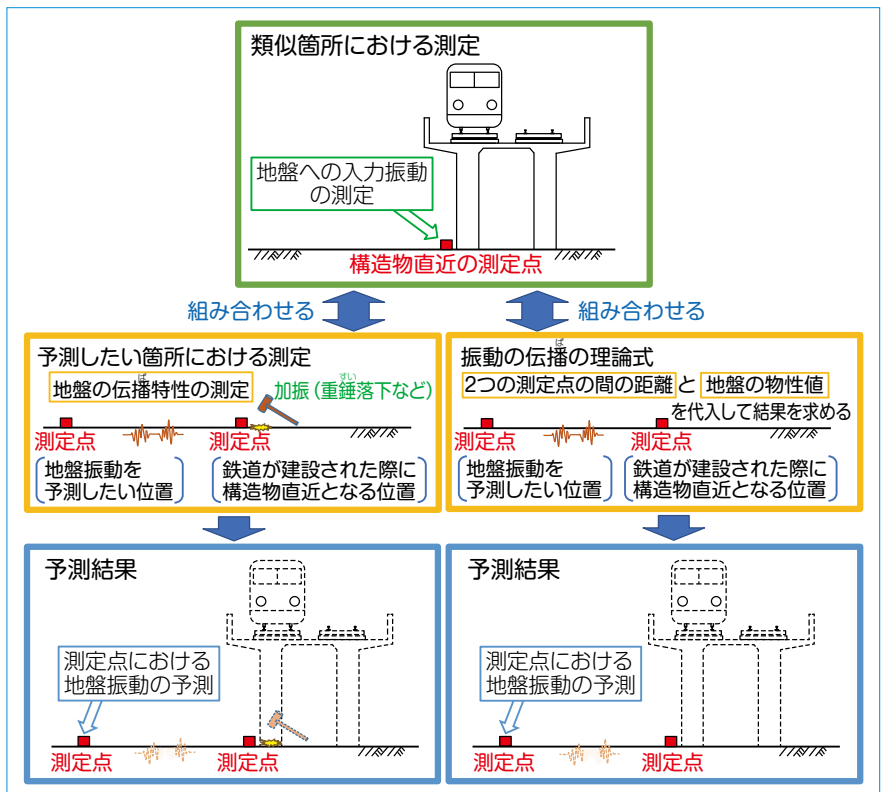


図3 「③-1類似箇所と予測箇所の測定結果の組み合わせ(左)」と「③-2類似箇所の測定結果と理論式の組み合わせ(右)」のイメージ

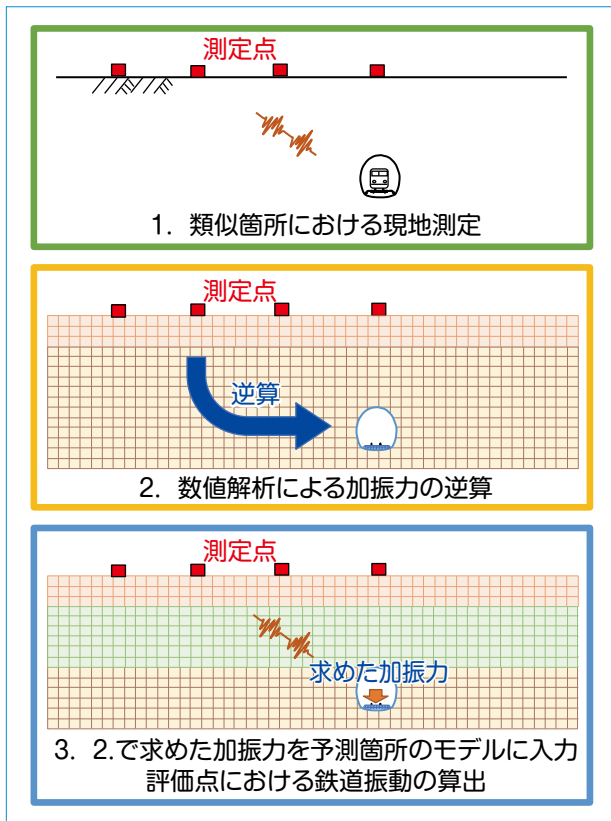


図4 「③-3等価起振力法」のイメージ

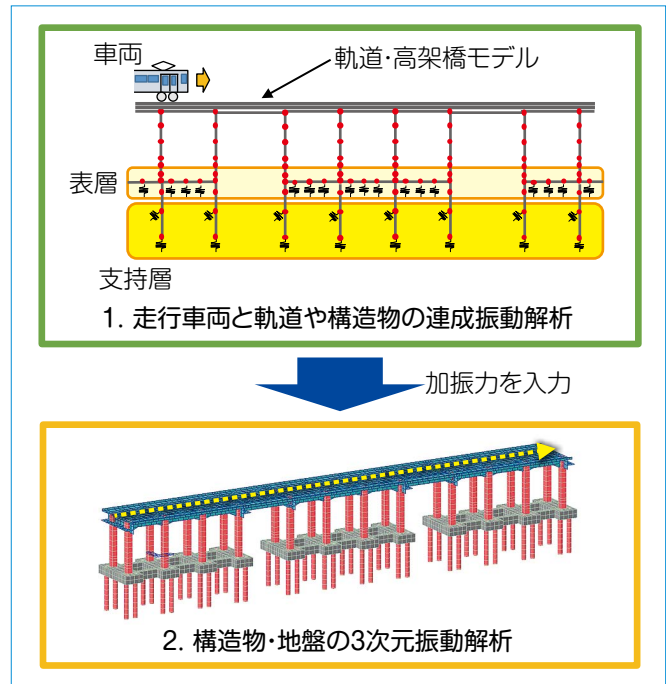


図5 「④解析のみによる予測手法」のイメージ

れますが、これらの要素の中で最も不確かと考えられる地盤の伝播特性だけは、現地の測定結果を用いる手法です。この手法では、類似箇所の構造物直近で測定した結果を地盤への入力振動とし、予測箇所において重錘落下などで求めた地盤の伝播特性と組み合わせることで予測値を求めます。

2つ目は、類似箇所の測定結果と理論式の組み合わせによる手法(図3右)です。これは、車両の種類や列車速度・構造物などの条件が類似する箇所の構造物近傍で測定した結果を地盤への入力振動とし、地盤の伝播特性は距離減衰式などの理論式で評価する手法です。

ここまで紹介をしてきた類似箇所の測定結果を用いる手法では、条件が類似している1箇所だけで行うのではなく、複数の類似箇所の測定記録を類似箇所の測定結果として用いた方がよいと考えられます。それは、複数の箇所で測定した箇所による地盤振動のばらつきを把握しておくことで、選定した

類似箇所に特異な傾向が含まれていたとしても、その傾向による結果のばらつきを抑えることができるからです。

3つ目の手法は、「等価起振力法」³⁾と呼ばれる手法です(図4)。これは、類似箇所での測定結果と数値解析を組み合わせて予測を行う手法です。この手法では、まず、類似箇所での振動測定を行います(図4の1)。次に類似箇所の数値解析モデルを作成し、先程の測定結果を正解値として加振力を逆算

します(図4の2)。最後に、予測箇所の数値解析モデルを作成し、逆算によって求めた加振力をモデルに入力し予測値を求めます(図4の3)。

この「等価起振力法」では、②の手法や③-1、③-2の手法よりも、類似箇所としての条件をある程度緩和できるという利点があります。また、防振壁などの対策工法の効果の検討などにも用いることができます。一方、この手法を適用する際にも、類似箇所での測定

1/3 オクターブバンド

環境振動や騒音などの評価に用いられる周波数軸の取り方です。オクターブはある周波数に対してその2倍となる周波数までの間隔のことで、身近なものとしては音階に使われています。周波数軸を取ったときに、その間隔を1オクターブごととして示したものがオクターブバンド、オクターブバンドの中をさらに3つに分けたものが1/3オクターブバンドです。また、1/3オクターブバンドはバンドとして示されている周波数だけの値ではなく、1/3オクターブの範囲内にある周波数を示します。そのため、図7では1/3オクターブバンドの中心の周波数を示しているという意味で、「1/3オクターブバンド中心周波数」としています。環境振動の分野では、1Hzのバンドから80Hzのバンドまでの計20バンドを基本的に評価の対象としています。

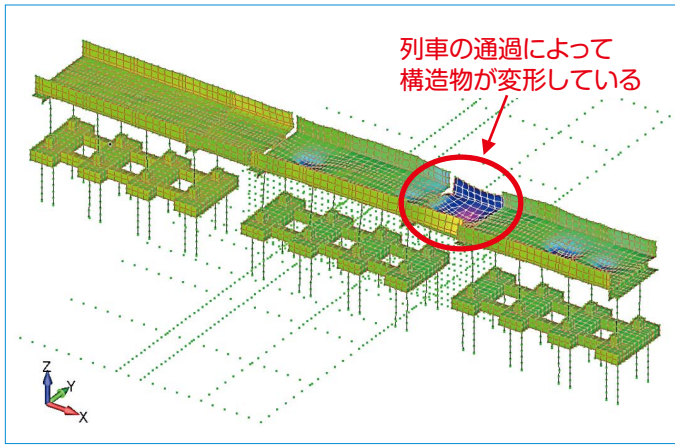


図6 「④解析のみによる予測方法」による解析結果の例
(変形を5千倍に拡大して表示)

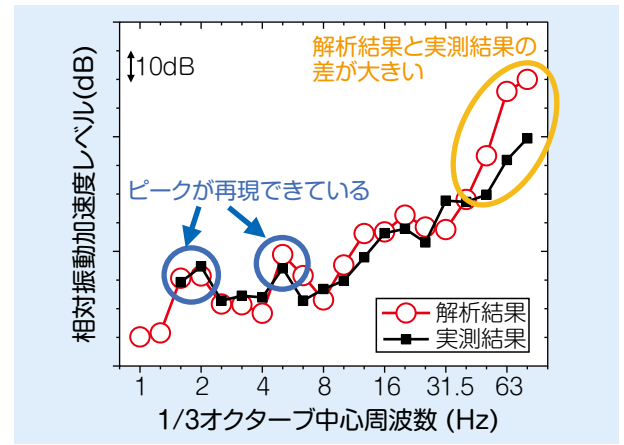


図7 実測結果と「④解析のみによる予測方法」による結果の例

が必要となります。また、類似箇所での測定は、振動源からの距離を変えた複数の点(少なくとも3点以上)で行わなければならない、適切な結果が得られません。

④解析のみによる予測手法

この手法では、車両・軌道・構造物・地盤(場合によっては沿線の建築物)を数値解析モデルで作成し、解析を行う手法です。ここまでで紹介してきた手法では、類似箇所における測定を行う必要がありましたが、この手法は車両や構造物の諸元、地盤のボーリングデータなどがあれば、現地測定が必要ないという利点があります。したがって、新車両や新しい構造物を導入した際などの類似する条件がない場合の予測にも用いることができます。

しかし、走行する車両と軌道・構造物・地盤(場合によっては沿線の建築物)を一体として3次元で解析すると、膨大な計算量が必要です。そこで、鉄道総研では「走行車両と軌道・構造物の連成振動解析」と「構造物・地盤の3次元振動解析」の2つに分けた鉄道振動を予測する手法⁴⁾の研究を行っています(図5)。「走行車両と軌道・構造物の連成振動解析」では、モデル化した軌道の上で列車を走行させることによって、列車が走行した際の加振力を計算します。次に、「構造物・地盤の3次元振動解析」では、

「走行車両と軌道・構造物の連成振動解析」で求めた加振力を入力とし、構造物や地盤における振動を求めます。

図6に④の手法の「構造物・地盤・建物の3次元振動解析」の結果の例を示します。図6では、列車通過中のある瞬間の構造物と地盤の変形を5千倍に拡大して表示しています。また、表示している色も変形を表しており、黄緑色の部分で変形が小さく、赤色や紫色の部分で変形が大きいことを表しています。

図6に示すように、④の手法では解析を行っている範囲の構造物や地盤の変形を見ることができます。したがって、この手法では、鉄道振動の予測だけでなく、メカニズムの解明や対策工法の効果の検討などに用いることもできます。

図7に実測結果と④の手法による解析結果の例を示します。縦軸に振動加速度レベル(単位はdB)を、横軸に1/3オクターブバンド(参照)の中心周波数を取っています。図7をみると、実測結果に現れている2Hzと5Hzのピークなどを含めて、低周波側の周波数バンドでは再現できているように見えますが、50Hz以上の高周波側のバンドになると実測結果と解析結果の差が大きくなっています。これは、高周波側の入力振動にレールの凹凸や軌道不整な

どの影響が大きいことや、高周波側ほど局所的な構造の影響を受けやすいことが原因であると考えられます。したがって、高周波側までの精度の良い予測を行うためには、より詳細な解析モデルが必要となる可能性があります。

おわりに

今回は、実務で使用している鉄道振動の予測手法の解説と現在研究を行っている手法の紹介をしました。

今後は、現在研究を行っている手法に加え、既存の①から③の手法についても、精度の向上や手順の簡略化などに取り組みたいと考えています。RRR

文献

- 1) 日本騒音制御工学会編：地域の環境振動，技報堂出版，pp.128-143，2001
- 2) 市東邦生：環境振動予測手法を用いた適用事例—地下鉄振動—，環境振動予測手法の現状と適用事例，日本騒音制御工学会・研究会技術レポート，No.20，pp.20-26，1997
- 3) 吉岡修：等価起振法による地盤振動の予測解析，鉄道総研報告，Vol.10，No.2，pp.41-46，1996
- 4) 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