

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

横山 秀史* 伊積 康彦** 渡辺 勉***

A Numerical Simulation Method for Ground and Building Vibration Based
on Three Dimensional Dynamic Analysis

Hidefumi YOKOYAMA Yasuhiko IZUMI Tsutomu WATANABE

Numerical simulation is an effective tool for investigating the properties of the source and propagation of train induced vibration. However, the analysis of the whole model of train-induced vibration, which consists of the moving train, the track, the supporting infrastructure, the ground, and the building, is currently too large to solve. We thus proposed a numerical simulation method by combining two separate dynamic analysis models. One is an analysis model of the dynamic interaction between the moving train and the track-structure system for calculating excitation force. The other is a three dimensional dynamic analysis model of the supporting structure, the ground, and the building for calculating the propagation of vibration.

キーワード：3次元動的連成解析，地盤振動，建物振動，数値シミュレーション

1. はじめに

列車走行にともなって沿線の地盤や建物に生じる振動（以下、鉄道振動）は場合により環境問題となることがある。鉄道振動の発生・伝播のメカニズムを解明し、有効な予測や対策を検討する上で予測シミュレーションは重要なツールである。鉄道振動は道路交通振動と同様に車両の走行により生じる振動であるが、同じ形式の車両が繰り返し通過することによる加振力の周期性の高さや、鋼製の車輪とレールの接触による高い周波数の振動の発生、軌道という鉄道固有の構造と車両の連成振動の影響など、鉄道に固有の特徴がある。

このような観点から、鉄道振動の予測シミュレーションに関わる分野においては、発生源のモデルと伝播系のモデルの各々について従来より多くの研究がなされている。発生源側のモデルとして、例えば古田ら¹⁾は低ばね係数軌道の振動特性の解明を目的に台車・軌道系の連成振動解析を構築し手法の妥当性等を検討した。また、川谷ら²⁾は3次元車両モデルと高架橋の3次元有限要素モデルを連成させた解析手法により、列車走行時の高架橋の振動解析を行い、手法の妥当性の検討や振動低減対策の検討などを行っている。伝播系のモデルについても、高速鉄道を対象とした Krylov³⁾による一連の研究や神田ら⁴⁾らによる波動場のシミュレーションの検討など多

くの研究がなされている。

鉄道総研においても、鉄道車両と軌道・土木構造物の連成をモデル化した3次元解析モデルによる振動解析法⁵⁾を開発し、車両と構造物の動的相互作用の検討に活用している。鉄道振動そのものの評価を目的としたモデルとして、ばね-質点系と弾性床土上の二重梁の振動の解析モデルに基づく地盤振動の発生モデル⁶⁾により車両の軽量化や軌道低ばね化などによる振動低減効果の評価を行ってきた。

また、近年はトンネルや盛土、平地区間などを対象に、走行車両～軌道・土木構造物の連成振動解析のモデルと土木構造物～地盤の3次元振動解析のモデルを連携させた地盤振動の予測シミュレーション手法の開発と精度向上に取り組んできた^{7) 8)}。その際解析を効率的に行うため、トンネルや平地など線路方向には近似的に一樣と見なせるケースについては、加振点をモデル中央付近の1～数点程度に限定して線路方向に多数設定した受振点における点加振解を計算し、得られた各点の応答を時間差を考慮して足し合わせるという方法で行った。

しかし、ラーメン高架橋など線路方向に構造が一樣でない構造物を対象とした場合、最低限ラーメン1セット分の加振点に対する点加振解が必要となる。また、受振側の建物や振動遮断工等を考慮した解析を行う場合には受振点の移動による方法は適用できない。

近年の計算速度の向上に伴い、軌道や構造物上の複数の加振点ごとに異なる加振力波形を入力する解析がある程度現実的な時間で実行可能となったことから、ラー

* 防災技術研究部 地質研究室
** 構造物技術研究部 建築研究室
*** 鉄道力学研究部 構造力学研究室

特集：環境工学

高架橋区間を対象に車両の移動などの影響を考慮した地盤および建物振動の予測シミュレーション手法を検討した。本報では、その結果を実測結果と合わせて報告する。

2. 予測シミュレーションの基本構成

鉄道車両は軌道や構造物、地盤などと連成して振動しながら走行しており、厳密には走行する車両から沿線地盤や建物までを一体のモデルとして解析する必要がある。しかし、計算規模や計算速度等の制約のためこのような解析は現状では困難であることから、走行車両～軌道・土木構造物の連成振動解析のモデルと土木構造物～地盤の3次元振動解析の二つの解析モデルに分割した上で両者を連携させた地盤振動の予測シミュレーションとした。

二つの解析の連携方法は加振力の受け渡しによる方法や構造物振動と振動伝達量の組合せによる方法などさまざまなパターンが考えられる。本研究では、走行車両～軌道・土木構造物の連成振動解析のモデル（加振力解析モデル）と振動の伝播解析を行うための土木構造物～地盤の3次元振動解析のモデル（振動伝播解析モデル）の二つの動的解析モデルを、軌道の底面と高架スラブ等の間での加振力の受け渡し（図1）により連携させて地盤振動の計算を行う。計算の流れは以下の通りである。

- (1) 車両・軌道・構造物の連成振動解析により、走行車両による移動加振力を計算する。
- (2) (1) で求めた加振力を構造物・地盤・建物の振動伝播解析に入力し、沿線の地盤や建物の振動を計算する。

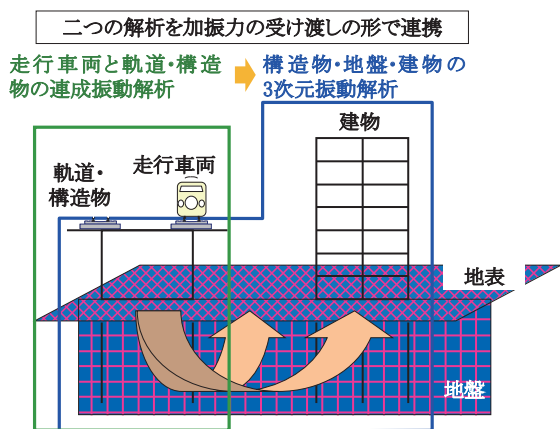


図1 シミュレーションの基本構成

3. 鉄道近傍地盤・建物の鉄道振動測定^{9) 10)}

数値解析の検証用データを得るため、新幹線高架橋に近接する地盤と建物内で新幹線通過時の列車振動を測定した。測定位置の平面図を図2に、断面図を図3に示す。測定箇所はA駅端部付近の高架橋で、構造は中層梁のある4線5柱ラーメン、地表から高架スラブ下面までの

高さは約14mである。ラーメンブロック間は単線T桁で、軌道はバラスト軌道である。当該箇所は地盤がやや傾斜しており、高架橋～建物周辺地盤まではほぼ平坦になっているが、建物付近を境に線路直交方向に地盤が高くなっている。また、線路方向には終点方ほどやや地盤が高くなっている。また、建物は周囲をやや掘り下げて建てられており、1階の床面が周辺地盤よりも低くなっている。

測定対象建物は、RC造地上4階建ての事務所が高架橋との離れは約3～8mである。測定位置は、高架橋柱脚、高架橋と建物の中間地盤、建物の1階から4階の柱脚および床中央の合計25点で、水平2方向(X:線路平行方向、Y:線路直交方向)と鉛直1方向(Z)について、振動レベル計と広帯域の汎用振動計(Z方向のみ測定)を用いて測定した。さらに、高架橋縦梁の鉛直振動をUドブプラー¹¹⁾で測定した。地盤データを取得するため、振動測定と並行して表面波探査を行った。

現地では上下26本の列車を測定し、1/3オクターブバンド分析を行った。時定数は630ms、分析値は列車通過時のバンドマックス値とした。列車ごとのばらつきが小さかったことから、本報では全測定位置について暗振動の影響が比較的小さいと判断された上り通過列車1本(通過速度160km/h)の結果を代表例として示す。また、

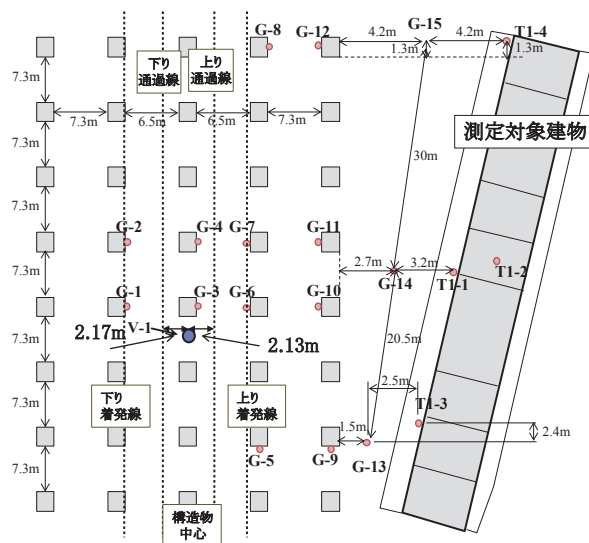


図2 測定位置図（平面）

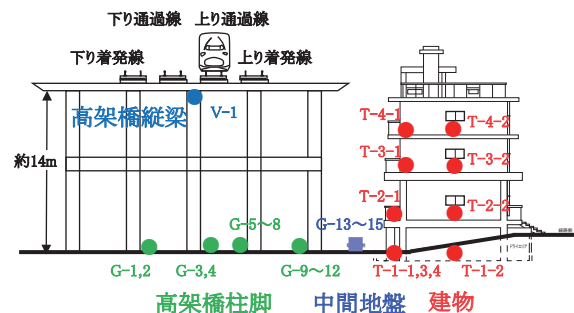


図3 測定位置図（断面）

鉛直方向については汎用振動計による結果を示す。本報では、分析・解析結果を高架橋縦梁 (V-1) 振動のスペクトルの最大値を 0dB とする相対振動加速度レベルで示す。

高架橋・地盤・建物の振動加速度の 1/3 オクターブバンドスペクトルを図 4 に示す。図 4 (a) より高架橋の橋脚近傍から建物との中間位置までの地盤における鉛直振動を比較すると、5Hz 以上の周波数帯域については橋脚近傍の 4 測定点 (G1 ~ G10) で大きな差がないことがわかる。一方、4Hz 以下の帯域の振動は通過線である上り線近傍の 2 点 (G-3, G-6) が顕著に大きく、反対線側橋脚近傍 (G-1), 高架橋端部 (G-10), 高架橋と建物との中間 (G-14) の順に振動が小さくなっていることがわかる。また、20 ~ 63Hz 帯域については、中間の地盤での振動が高架橋近傍よりも大きくなっていることが特徴的である。

次に図 4 (b) より高架橋と建物の中間位置の地盤における 3 成分の振動を比較すると、いずれの成分も 31.5 ~ 80Hz にピークがあることがわかる。また、2.5Hz 以下の低い周波数帯域では水平方向の方が鉛直方向よりも振動が大きく、63Hz 以上の高い周波数帯域では鉛直方向の振動の方が水平方向よりもやや大きいことなどがわかる。

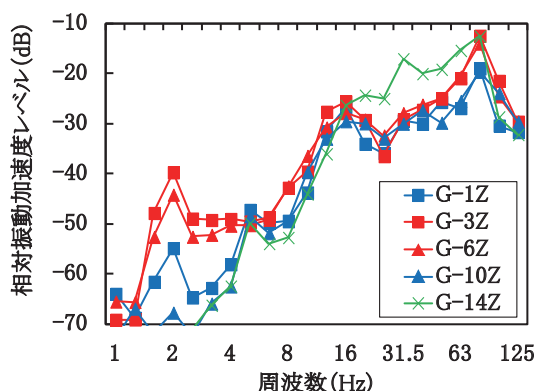
建物 4 階の床中央 (図 4 (c)) の振動に着目すると、5Hz, 16 ~ 20Hz, 40Hz, 80Hz の各帯域にピークがあり、鉛直振動では 20Hz のピークが最も大きいことがわかる。また、8~10Hz 帯域を境として、6.3Hz 以下の周波数帯域では水平方向の振動の方が鉛直方向よりもやや大きく、12.5Hz 以上の周波数帯域では鉛直方向の方が水平方向よりもやや大きい。

図 4 (d) より高架橋・地盤・建物の鉛直動を比較すると、高架橋縦梁 (V-1Z) から地盤 (G-6Z) へ伝播する際に、全周波数帯域で振動は減衰している。地盤と建物 1 階柱脚 (T1-1Z) とを比較すると、20Hz 程度以下では大きな振動加速度レベル差はないが、25 ~ 31.5Hz 以上で差が大きくなり、周波数が高くなるほど振動加速度レベル差が大きくなる傾向である。建物 1 階と 4 階 (T4-1Z) は同程度の大きさであり、本建物については建物内での距離減衰はほとんど生じていない。

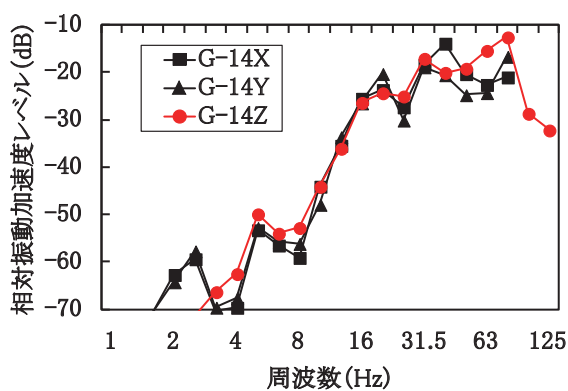
4. 構造物・地盤・建物の 3 次元振動解析^{10) 12)}

4.1 車両・軌道系の動的解析

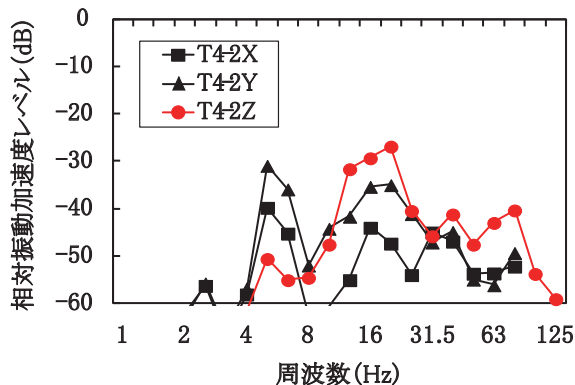
車両・軌道系の動的解析は DIASTARS III (鉄道総研)⁵⁾



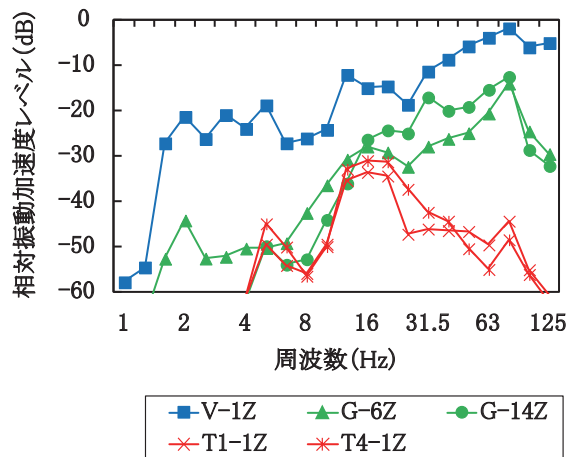
(a) 橋脚近傍～高架橋・建物の中間地盤(Z成分)



(b) 高架橋・建物の中間地盤(XYZ成分)



(c) 建物4階床中央(XYZ成分)



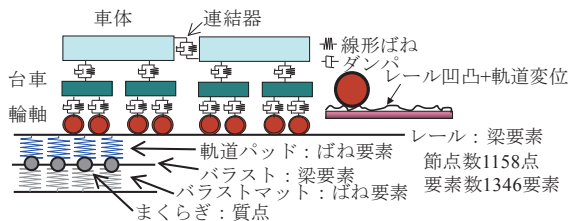
(d) 高架橋・地盤・建物の振動の比較(Z成分)

図 4 測定結果の例 (上り列車, 速度約 160km/h)

特集：環境工学

を用いて行った。車両・軌道系の解析モデルを図5に示す。車両モデルは車体、台車及び輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパで結合したものである。車両は近年の一般的な新幹線車両、軌道はバラスト軌道とした。軌道は3次元有限要素でモデル化し、レール及びバラストは梁要素、まくらぎは質点、軌道パッド及びバラスト下のバラストマットはばね要素を用いてモデル化した。バラストは荷重分散を考慮するために梁要素とした。また、路盤は剛とした。

本モデルでバラストマットに相当するばね要素の鉛直方向ばね反力を求め、これを加振力として構造物・地盤・建物系の解析モデルに入力した。列車速度は160km/hとした。加振力波形の例を図6に示す。



下端固定(剛な路盤)

図5 車両・軌道系の連成振動解析モデル

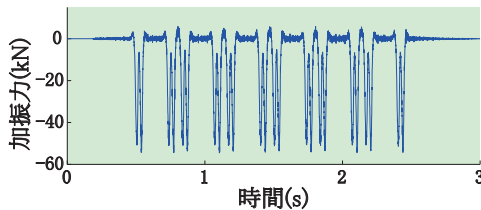


図6 加振力波形の計算例 (バラストマットのばね反力)

4.2 構造物・地盤・建物系解析

前項の解析で求めた加振力波形を図7の解析モデルに入力し、高架橋の近傍地盤および事務所建物の振動を求めた。解析にはSuperFLUSH / 3D (構造計画研究所)を使用し、高架橋および建物は梁要素およびシェル要素、地盤は薄層法により水平成層地盤としてモデル化した。地盤の物性値は表面波探査結果などを参考にP波速度(V_p)は1500 m/s、S波速度(V_s)は300m/s前後とし、減衰定数(h)は5%とした。また、建物は $h=5%$ とした。

図8に高架橋縦梁(Z-1Z)での解析結果と測定結果を示す。この図より両者は良い対応を示しており、列車加振力の設定は概ね妥当であるといえる。

次に、高架橋と建物の中間地盤(G-14Z)の解析結果と測定結果を図9に示す。地盤については80Hz以下の帯域では基本的な傾向は一致しているが、実測値との加速度レベル差が10dB程度生じている周波数帯が多いことがわかる。原因としては、地盤物性の誤差の他、地盤を水平成層構造としてモデル化したことによる誤差、構

造物基礎周辺の地盤の局所的な乱れの影響などさまざまな要因が考えられ、今後さらに検討が必要である。

建物4階床(T4-2)での結果を図10に示す。いずれの方向も、80Hz以下で振動性状は概ね一致しており、実測値との加速度レベル差も一部周波数を除いて5~10dB程度以下である。

次に、解析誤差が生じる要因を検討するため、加振方法や地盤物性を変えて解析を行った。地盤(G-14)における、移動加振条件と線加振条件での解析結果の比較を図11に示す。ここで線加振条件は、列車の移動を考慮せず全ての加振点に同じ加振力波形を同位相で入力し

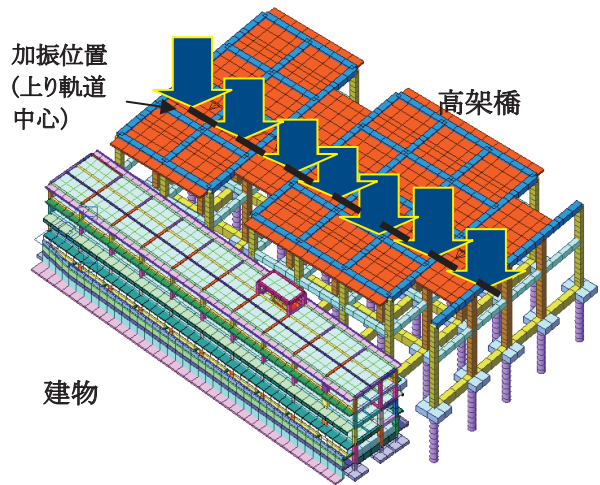


図7 構造物・地盤・建物系の解析モデル

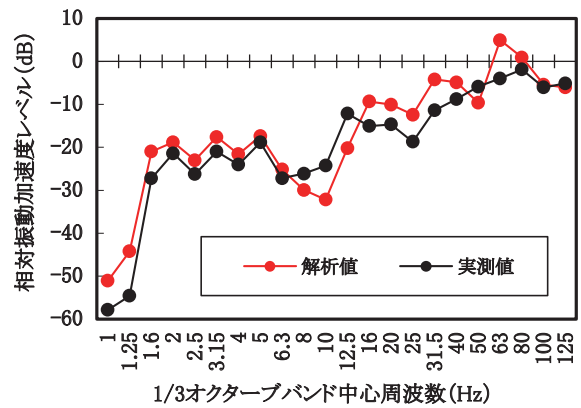


図8 解析値と実測値との比較 (高架橋縦梁 Z-1Z)

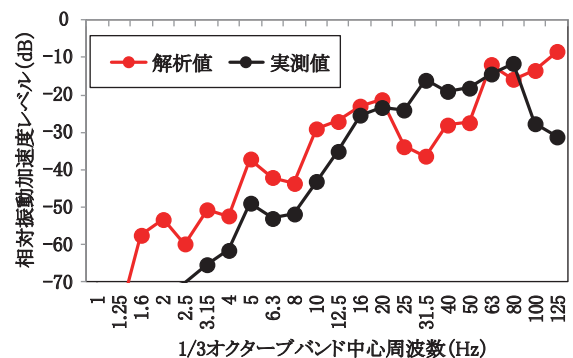


図9 解析値と実測値の比較 (地盤 G-14Z)

た結果である。この図より、ピークを生じる周波数や各ピークの大さの相対的な関係などについては、移動加振条件と線加振条件の違いは比較的小さい。しかし、得られた振動の大きさに着目すると、20Hz以下では線加振条件による結果が移動加振条件による結果よりも30～40dB程度大きいなど、線加振条件による結果の方がかなり大きい。このように、全体的に移動加振による結果の方が実測値との対応が良いことが確認できた。

地表から深さ3.4mまでの表層地盤の物性値を $V_s = 170$ m/s, $h = 2\%$ に変化させた場合の地盤(G-14)での解析結果を図12に示す。ここで表層の厚さおよび V_s は建設時の柱状図のうち、測定箇所にもっとも近い位置のものを参考に設定した。この図より、地盤の物性値を変えると結果は大きく異なり、地盤物性値が解析結果に与える

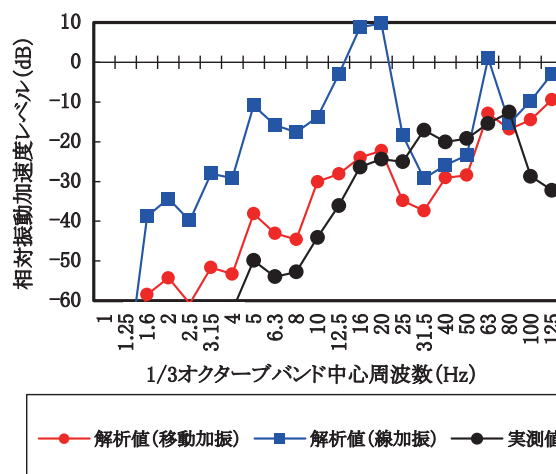
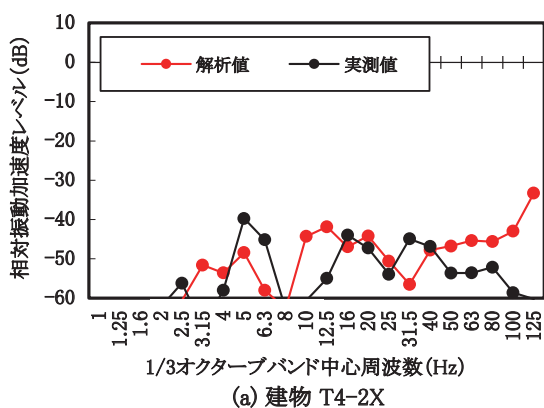
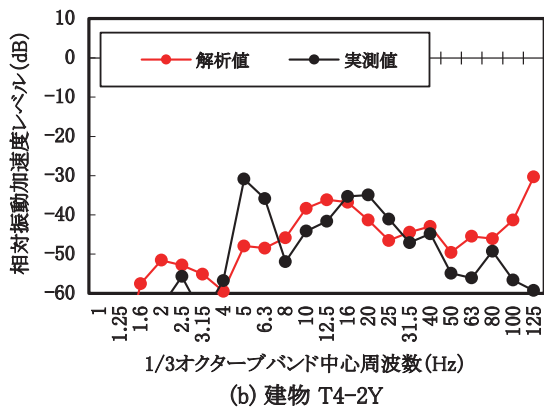


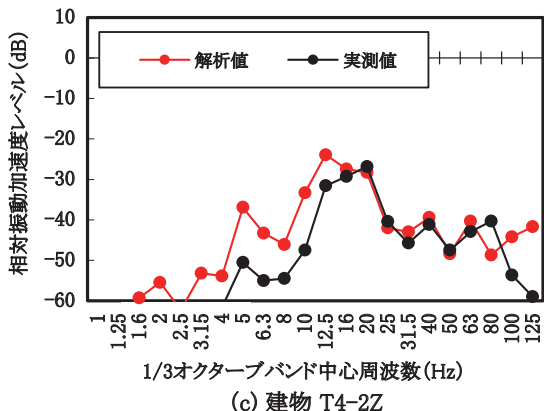
図11 移動加振と線加振の比較



(a) 建物 T4-2X



(b) 建物 T4-2Y



(c) 建物 T4-2Z

図10 解析値と実測値との比較（建物床振動）

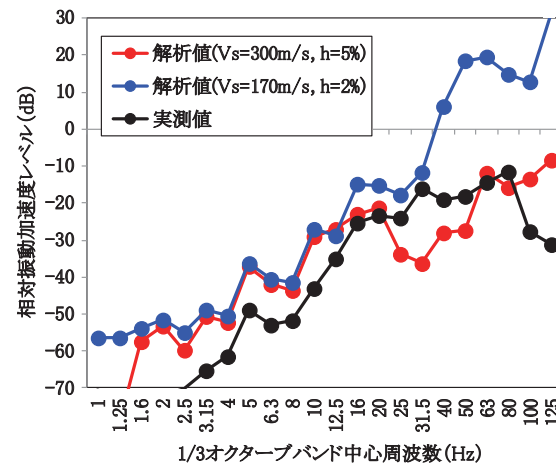


図12 地盤条件による比較

影響が非常に大きいことが分かる。解析では柱状図や物理探査結果などから地盤特性値を設定するが、地盤深部まで地盤性状を把握することは困難である。解析精度を高めるための地盤物性値の設定方法については今後の課題である。

5. 加振力解析のモデル化方法による解析結果への影響の検討

前章のとおり、本報では軌道支持ばね下端を固定した剛な路盤の加振力解析モデルを用いて構造物や地盤、建物振動を計算し、構造物振動については実測結果を概ね再現可能なことを確認した(図8)。しかし、本報で検討した高架橋は駅部の5柱ラーメンであり、一般区間の2柱ラーメン高架橋よりも全体に剛な構造である。そこで、車両と構造物の連成振動が地盤振動の加振力解析に与える影響の基礎検討として、剛な路盤のモデルと高架橋のスラブおよび縦梁に相当する剛性の梁を考慮したモデル(図13)の2つの加振力解析モデルによる、一

特集：環境工学

般区間のラーメン高架橋の高架スラブの応答の試解析を行った(図14)。軌道はスラブ軌道のモデルとした。

この図より、両モデルの解析結果は比較的近い値であるが、中間スラブと張出スラブのいずれの部位においても一部に4~5dB程度のかい離を生じる周波数帯域があるなど、条件によっては解析結果に影響する可能性があることを確認した。加振力解析における構造物の適切なモデル化方法については、今後さらに検討が必要である。

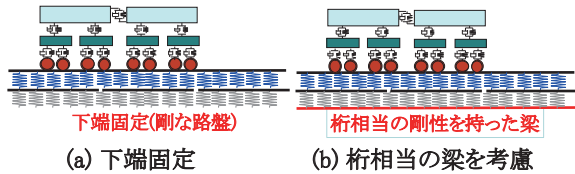


図13 加振力解析モデル

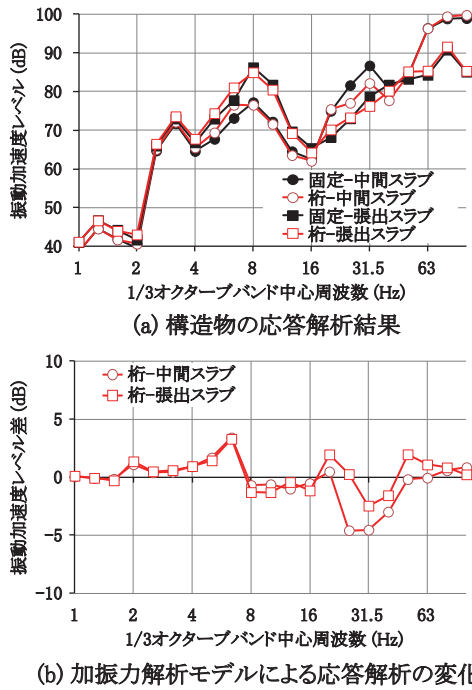


図14 加振力解析モデルの違いによる構造物応答への影響の検討

6. おわりに

新幹線鉄道振動を対象として、移動加振源を考慮できる列車・軌道モデルから得られた列車加振力を入力とする構造物・地盤・建物の3次元解析モデルを用いた列車振動解析を行った。本報で解析に用いたモデルでは、全体的な傾向として実測値と良い対応が得られた。しかし、解析精度をより向上させるためには、鉄道構造物や建物

などの構造物と地盤との振動伝達特性のモデル化方法や、地盤の物性値の与え方、加振力解析時の構造物のモデル化による影響など多くの課題が残されている。今後は本報の手法にもとづいて鉄道振動対策の検討を行うとともに、これらの課題について検討を進め、解析精度の向上を図っていきたいと考えている。

文献

- 1) 古田勝, 阿部和久: 走行荷重を受ける軌道振動系の連成解析, 土木学会論文集, No.583/IV-38, pp.61-70, 1998
- 2) 川谷充郎, 何興文, 白神亮, 関雅樹, 西山誠治, 吉田幸司: 高速鉄道高架橋の列車走行時の振動解析, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, pp.509-519, 2006
- 3) Krylov, V.V. (ed.): Noise and vibration from high-speed trains, Thomas Telford, London, UK, pp.251-284, 2001.
- 4) 神田仁, 吉岡修, 石井啓稔, 加藤政史, 真田佳典, 松岡俊文, 三善孝之: 移動荷重による波動場のシミュレーションにおける振源モデリングについての考察, 物理探査, Vol.58, No.4, pp.363-375, 2005
- 5) 涌井一, 松本信之, 松浦彰夫, 田辺誠: 鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究, 土木学会論文集, No.513/ I -31, pp.192-138, 1995
- 6) 吉岡修, 芦谷公稔: 新幹線鉄道振動の発生・伝播モデル, 物理探査, Vol.48, No.5, pp.299-315, 1995
- 7) 渡辺勉, 曾我部正道, 横山秀史, 山崎貴之: 高速鉄道トンネル上の地盤振動に関する解析的検討, 鉄道工学シンポジウム論文集, No.18, pp.107-114, 2014
- 8) 蒲原章裕, 加藤信二郎, 横山秀史, 岩田裕一: 平地区間における列車走行時の地盤振動シミュレーションの基礎検討, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, 2014
- 9) 伊積康彦, 横山秀史, 上半文昭: 高速鉄道の3次元振動解析に関する研究 その1 新幹線高架橋近傍地盤と建物での鉄道振動測定, 2014年度建築学会大会学術講演梗概集, 2014
- 10) 横山秀史, 伊積康彦, 渡辺勉, 三橋祐太: 3次元振動解析による鉄道振動の予測シミュレーション, 日本騒音制御工学会2014年度秋期研究発表会概要集, 2014
- 11) 上半文昭: 構造物診断用非接触振動測定システム「Uドブラー」の開発, 鉄道総研報告, Vol.21, No.12, pp.17-22, 2007
- 12) 三橋祐太, 伊積康彦, 横山秀史, 渡辺勉, 庄司正弘: 高速鉄道の3次元振動解析に関する研究 その2 新幹線の3次元振動解析, 2014年度建築学会大会学術講演梗概集, 2014