

3次元解析による高架橋、地盤、建物の振動シミュレーション手法

構造物技術研究部 建築研究室

室長 伊積康彦

1. はじめに

列車走行に伴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シミュレーションは重要なツールである。トンネル区間や地平区間を対象とした場合には、線路方向の地盤条件や軌道条件が近似的に同様とみなせることから、加振点をモデル中央付近の1～数点程度に限定し、線路方向に多数設定した受振点での応答を、時間差を考慮して足し合わせる手法などにより解析の効率化を図ることが可能である。しかし、ラーメン高架橋区間や沿線建物での応答を求める場合にはこの手法を適用することができないため、3次元モデルに対して加振点の移動や建物形状を考慮した解析が必要となる。一方で、近年の計算機の処理速度の向上に伴い、複数の加振力波形を入力した場合の解析が、ある程度現実的な時間で実行可能となったことから、ラーメン高架橋を対象に車両の移動の影響を考慮した、高架橋・地盤・建物の振動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併せて報告する¹⁾。

2. シミュレーションモデルの構成

鉄道車両は、軌道・構造物・地盤などと連成して振動しながら走行しているため、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などの制約のために一体モデルでの解析は現状では困難であることから、走行車両・軌道・構造物の連成振動解析モデル（加振力解析モデル）と構造物・地盤・沿線建物の3次元振動解析（振動伝播解析モデル）の2つの解析モデルに分割した上で両者を連携させる構成とした。両モデルの連携は、軌道底面と高架スラブ面との間で加振力を受け渡すことによるものとした（図1）。解析の流れは以下のとおりである。

(1)加振力解析モデルにより、走行車両による軌道底面の移動加振力を計算する。

(2) (1)で得られた加振力を振動伝播解析モデルの高架橋スラブ面などに入力し、地盤上や建物内の応答振動を計算する。

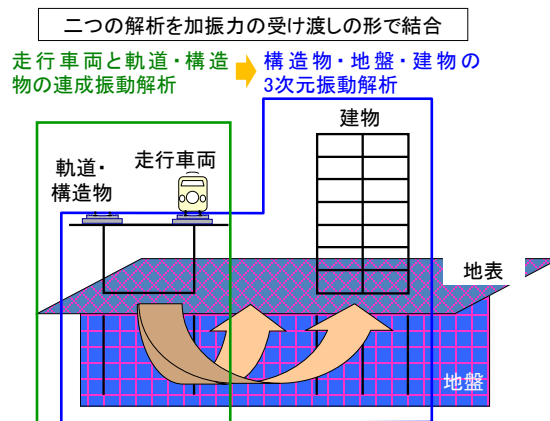


図1 シミュレーションの構成

3. 高架橋区間の検討例

3.1 鉄道近傍地盤・建物の鉄道振動測定

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駅端部付近の中層梁のある4線5柱ラーメン高架橋で、地表面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、軌道種別はバラスト軌道である。当該個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方向に地盤が高くなっている。そのため、建物は周囲をやや掘り下げて建てられており、建物の高架橋側の1階床面は周辺地盤よりも低くなっている。測定対象建物は鉄筋コンクリート造地上4階建ての事務所で、高架橋との離れは約3～8mである。

中間地盤（G-14）における水平2方向と鉛直方向の振動加速度レベルを比較したものを図4に示す。3方向ともに31.5～80Hzにピークを有している。また、2.0～2.5Hzでは水平方向が鉛直方向よりも振動が大きく、63～80Hzでは鉛直方向の振動が水平方向よりもやや大きくなっている。高架橋柱脚、中間地盤、建物柱脚の鉛直振動を比較したものを図5に示す。高架橋縦梁（V-1Z）から高架橋柱脚（G-6Z）へ伝播する際に、全周波数範囲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無いが、25～31.5Hz

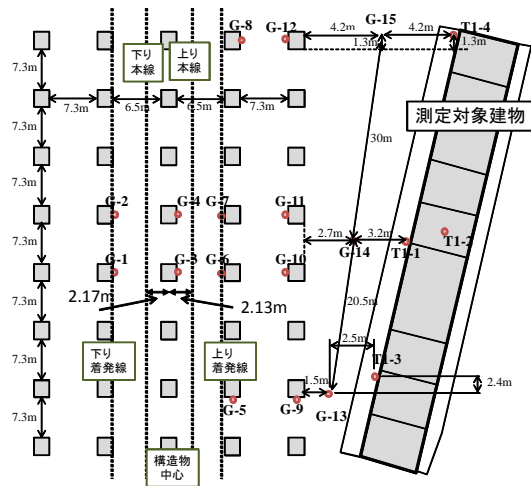


図2 測定位置図（平面）

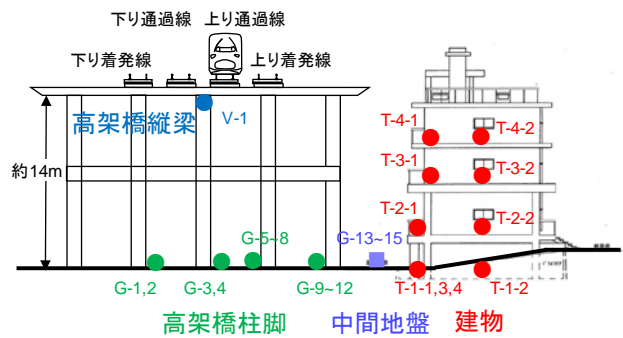


図3 測定位置図（断面）

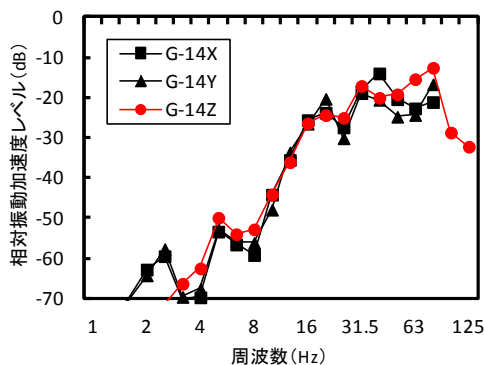


図4 地盤振動測定結果（G-14）

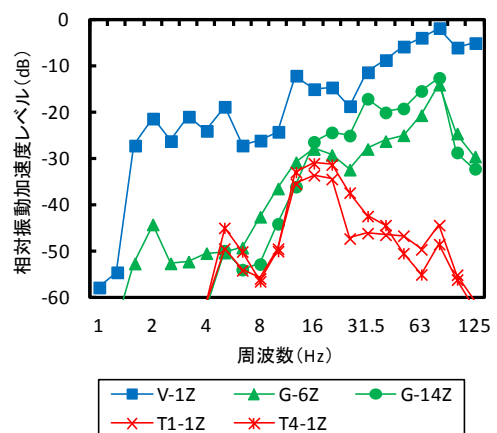


図5 高架橋・地盤・建物振動の比較

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。

3.2 構造物・地盤・建物の3次元振動解析

本検討での列車加振力の解析は DIASTARSⅢ（鉄道総研）²⁾を用いて行った。解析モデルを図6に示す。車両モデルは車体、台車およ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、レールおよびバラストは梁要素、まくらぎは質点、軌道パッドおよびバラストマットはばね要素、路盤は剛としてモデル化した。

振動伝播解析には SuperFLUSH/3D（構造計画研究所）を用いた。解析モデルを図7に示す。高架橋および建物は梁要素とシェル要素、地盤は薄層法により水平成層地盤としてモデル化した。

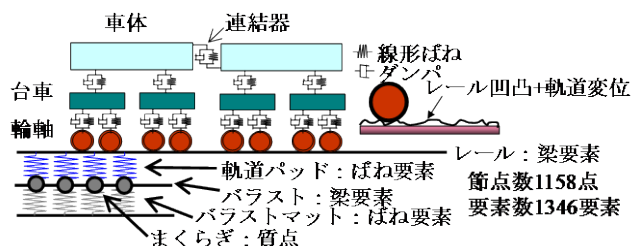


図6 車両・軌道系解析モデル

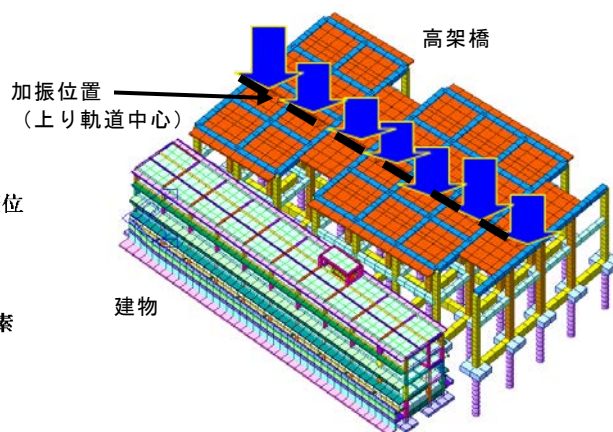


図7 構造物・地盤・建物系の解析モデル

高架橋縦梁（V-1Z）位置における解析結果と実測結果を比較したものを図8に示す。両者は良好な対応を示しており、列車加振力の設定は概ね妥当であるといえる。

次に、中間地盤（G-14Z）の解析結果と実測結果を図9に示す。80Hz以下では基本的な傾向は一致しているが、実測値との差が10dB以上生じている周波数帯域がある。原因として、地盤物性の誤差、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様々な要因が考えられ、今後さらに検討が必要である。

建物4階床（T4-2Z）での結果を図10に示す。80Hz以下での振動性状は概ね一致しており、実測値との差も一部周波数帯域を除いて5～10dB以下である。

次に、加振条件を線加振とした場合と比較した結果を図11に示す。ここでの線加振条件としては、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するものとした。移動加振条件と比較すると、ピークを生じる周波数や各ピークの大きさの相対的な関係などについては、両者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条件の方が線加振条件よりも実測値との対応が良いことが確認できた。

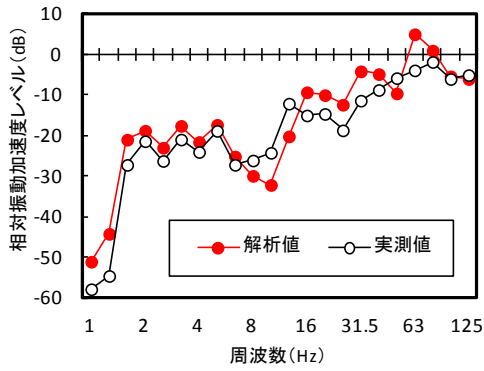


図 8 高架橋縦梁振動の比較 (V1-Z)

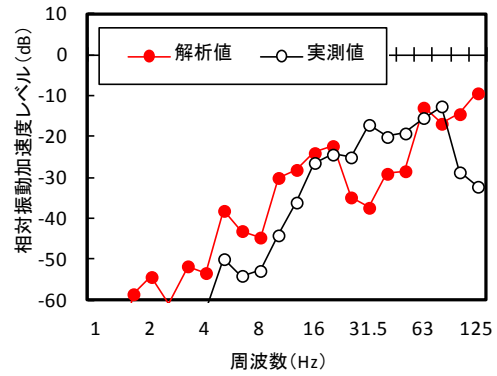


図 9 地盤振動の比較 (G-14Z)

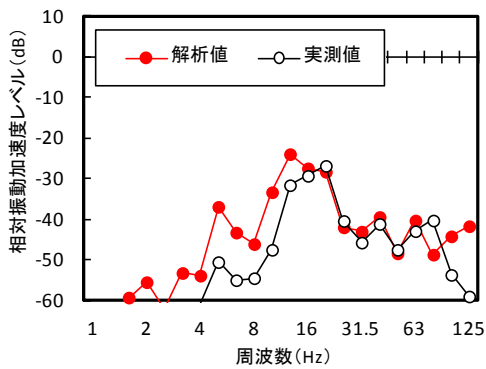


図 10 建物振動の比較 (T4-2Z)

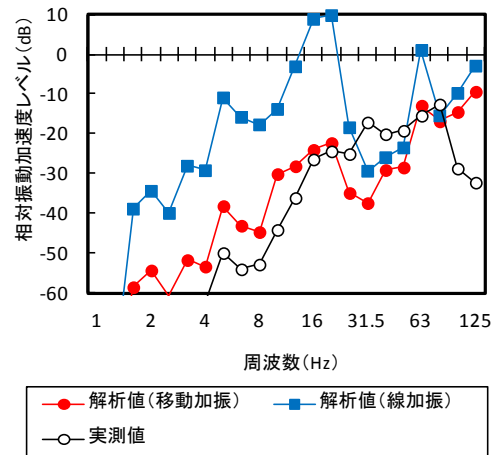


図 11 移動加振と線加振の比較 (G-14Z)

4. 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などの課題が残されている。今後、これらの課題についての検討を進め、解析精度の向上を目指す予定である。

参考文献

- 1) 横山秀史, 伊積康彦, 渡辺勉: 3次元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, 第29巻第5号, 2015.5
- 2) 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, 1995