

沿線建物の振動予測と対策

武居 泰
構造物技術研究部
(建築 研究室長)

伊積 康彦
同
(同 主任研究員)



たけい やすし いづみ やすひこ

はじめに

建物が密集している都市部では、既設の建物に近接して鉄道を敷設したり、既設の線路に近接して建物を建設したりするケースが多く見られます。列車走行に伴い発生する地盤の振動が建物内に伝わることで揺れが感じられたり、建物の床や壁が振動することに伴い発生する音（これを固体伝搬音といいます）が聞こえたりする場合があります（図1）。

鉄道振動は、車両が軌道を加振することにより発生しますが、加振位置は地平・盛土上、高架橋上、トンネル内など様々です。また、振動の受振側となる建物についても、階数や基礎の構造など条件が異なります。また、軌道と建物の間に介在する地盤についても、地層の構成や物性などの条件が場所によって差があります。これらの条件の違いが、建物内の振動や固体伝搬音の予測を複雑にし、実用的な予測手法の確立や予測精度の向上を妨げる主な原因となっています。

そこで、建物内の振動や固体伝搬音を予測する際に重要となる地盤から建物への振動の伝わり方について、模型実

験などからその詳細な性状を把握し、地盤と建物が相互に与える影響を考慮した簡便で実用的な予測手法を新たに提案したので紹介します。

沿線建物の振動を予測する一般的な手順

建物内の振動や固体伝搬音を予測するためには、地盤や建物などの各伝搬経路における振動特性や伝搬特性を把握する必要があります。予測における一般的な手順を図2に示します。

まず、加振源の振動予測として、軌道付近における実測結果を軌道のばね定数や列車速度などにより補正する方法や、車両と軌道を組み合わせたモデルの数値解析により推定する方法があります。次に加振源から地盤への振動伝搬については、簡易な距離減衰式や有限要素法などの数値解析が用いられます。線路がすでにあり、後から建物を建設する場合には、建設予定地での振動が測定できることから、加振源の振動予測や地盤の振動伝搬予測は省略できます。

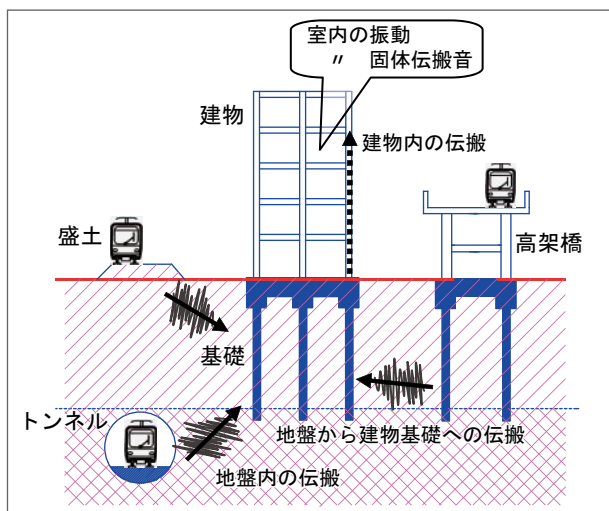


図1 加振源から建物への振動伝搬

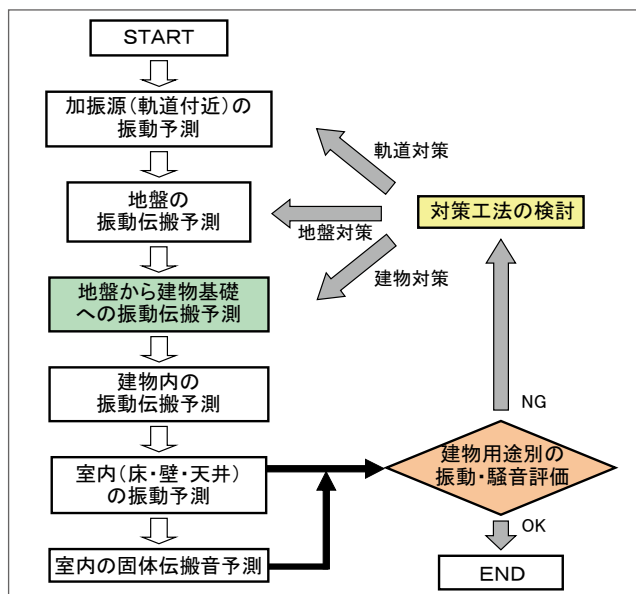


図2 沿線建物の振動予測フロー

地盤振動の予測は以上までですが、建物内の振動を予測する場合には、さらに地盤から建物基礎への振動の伝わり方を予測する必要があります。この部分の予測は、全体の予測精度に大きな影響を与えますが、地盤と建物が相互に与える影響を考慮する必要がありますが、精度よく予測することは容易ではありません。建物基礎の振動がわかれば、次に建物地上部分の振動伝搬を距離減衰式などで予測します。最終的に、人が生活する室内の体感振動を評価するため床上の振動を予測する必要がありますが、床スラブの振動特性を既往の実測結果や数値解析から求めます。また、室内の固体伝搬音については、部屋を構成する床、壁、天井の振動特性

などを考慮して計算することになります。

以上の予測手法は、伝搬経路ごとに分割して予測する方法ですが、地震時の建物の振動解析と同じように有限要素法などにより地盤と建物を一体的なモデルにして計算することも可能です。しかし、鉄道振動で対象とする周波数は地震動より高いこともあり、煩雑なモデル化や非常に多くの計算時間が必要であるため、一体モデルによる数値解析は、建物の設計業務などで用いる一般的な方法とはいえません。さらに、一体モデルでは、各振動伝搬経路ごとの特性や現象を理解しづらい欠点もあります。

予測した振動や固体伝搬音は、建物用途により評価し、対策の必要性を判断することになります。振動対策には、軌道、地盤、建物などにおいて様々な方法が提案されていますが、各振動伝搬経路ごとの振動特性や伝搬特性が明確であれば、有効な対策工法の選択や対策効果の推定も容易になります。

振動の伝わり方を調べるための模型実験

地盤から建物への振動の伝わり方は、地盤や建物の条件により異なります。振動伝搬の特性を詳細に調べるには、物性や形状などが既知である模型実験が有効な手段となります。しかし、実物大の模型実験では作業量や費用の面から現実的には不可能なので、詳細な測定や多くの実験条件を選定できる点において縮小模型実験が有効な手段となります。ただし、縮小模型の場合には、実物と模型との対応

(相似則)を考慮する必要があります。そこで、シーリング材などに用いられるシリコンゴムを地盤に見立て、縮尺1/50の縮小模型実験を実施しました(図3)。シリコンゴムは、材料の調合により、縮尺に見合うように硬さを調整することができます。シリコン地盤内にはアクリル製の杭とトンネル模型を埋め込むとともに、地盤の振動分布を把握するためのセンサーを多数設置しました。小型の起振器を地表面、杭頂部、トンネル内に設置して加振したときの地中部の振動分布を図4に示します。加振位置や周波数によって、地中部の振動分布が大きく異なることがわかりました。これは、地中に埋め込まれ

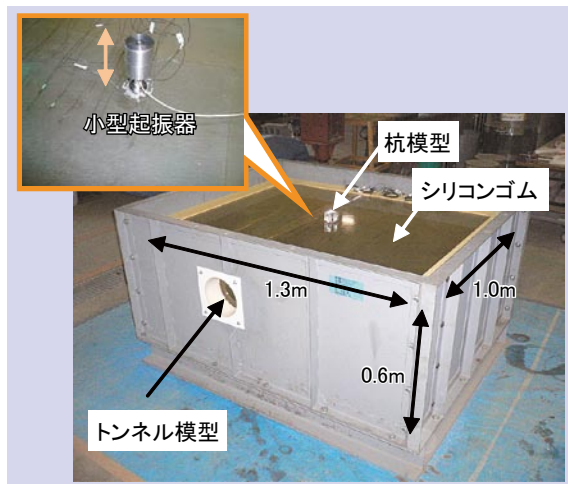


図3 シリコンゴムを使った模型実験

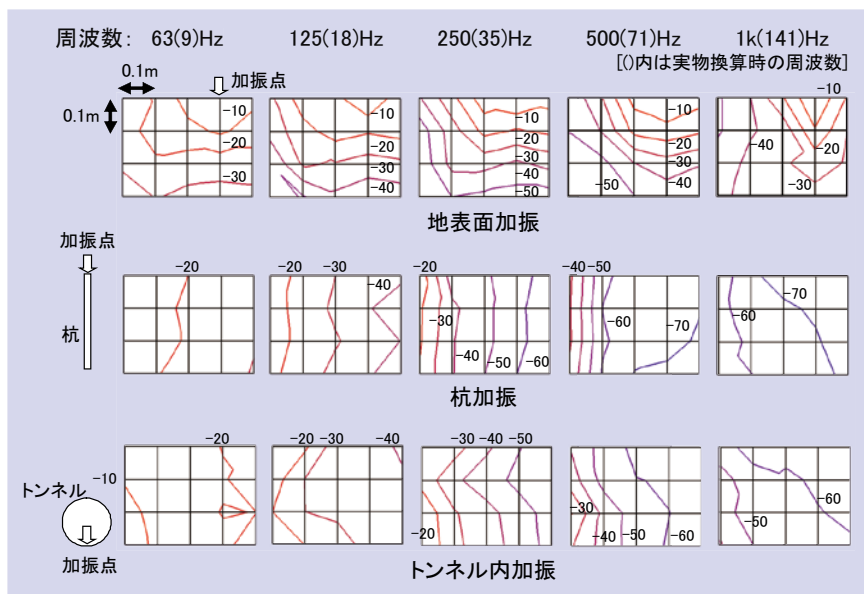


図4 シリコン模擬地盤内の振動分布
(加振近傍点からの振動加速度レベルの減衰量を表す [単位 dB])

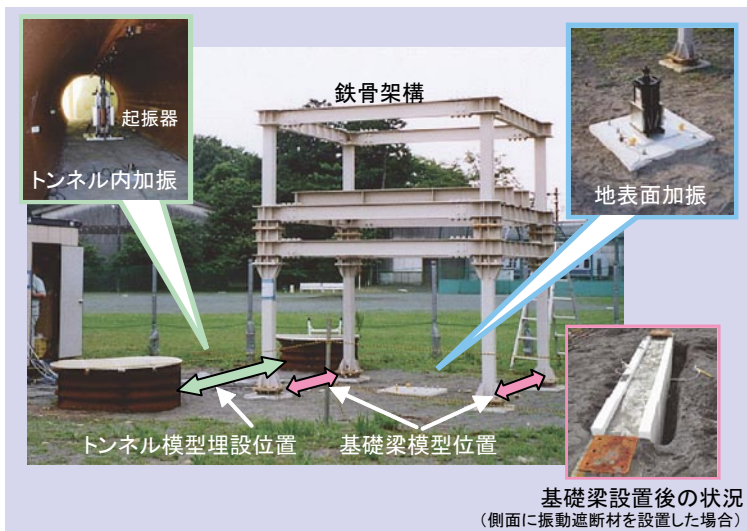


図5 規模の大きい模型を使った実験

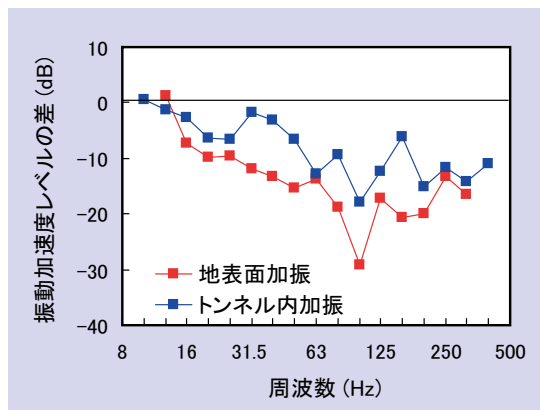


図6 地盤から杭への振動伝搬特性 (杭頂部-杭近傍地表面)

る杭の振動性状を予測するためには、地中部の振動分布を把握しておく必要があることを示唆しています。

厳密に相似則を合わせることはできませんが、より規模の大きい模型で実験するため、図5に示すように実際の地盤に鉄筋コンクリート製の模型杭（直径30cm，長さ3m）を設置し、その上部に鉄骨の架構を取り付けた模型も製作しました。また、地表面のほか地中部でも加振できるように鋼管製のトンネル模型（直径1m）を地中部に埋設しました。さらに、実際の建物には杭どうしをつなぐ基礎梁（地中梁）もあるため、基礎梁模型も追加して振動伝搬への寄与について検討しました。起振器で加振したときの杭頂部とその近くの地表面の振動加速度のレベル差を図6に示します。地盤から杭に入力する際に振動が低減し、その大きさは地表面を加振した場合のほうがトンネル内を加振した場合より大きいことがわかりました。そのほか、地表面を加振した場合、杭以外に基礎梁からの振動伝搬も無視できないことが確認できました。

地盤から建物への振動伝搬の予測手法

このような模型実験などを参考に、地盤から建物への振動伝搬を予測するための簡易な手法を提案しました。ここでは、建物基礎の種類は杭とし、振動の方向は鉄道振動で主に対象としている上下方向としました。予測フローを図7に示します。まず、建物の地上部分（上部構造）と地中部の杭を仮想的に切断します。次に、地盤の中に地盤より硬い杭があることによる振動の拘束効果と地中部の振動分布を考慮して上部構造に対する入力振動を求めます。一

方、上部構造の応答特性は、各階の質量をバネでつなぎ、それを地盤や杭の影響を表すバネで支えた簡易なモデルで求めます。最後に、入力振動と上部構造の応答特性を合わせることで建物内の振動を予測します。このように地盤と建物の相互作用を考慮するため、上部構造と地中部の基礎部分を分離して解く方法を動的サブストラクチャ法といい、耐震設計の分野ではよく用いられています。

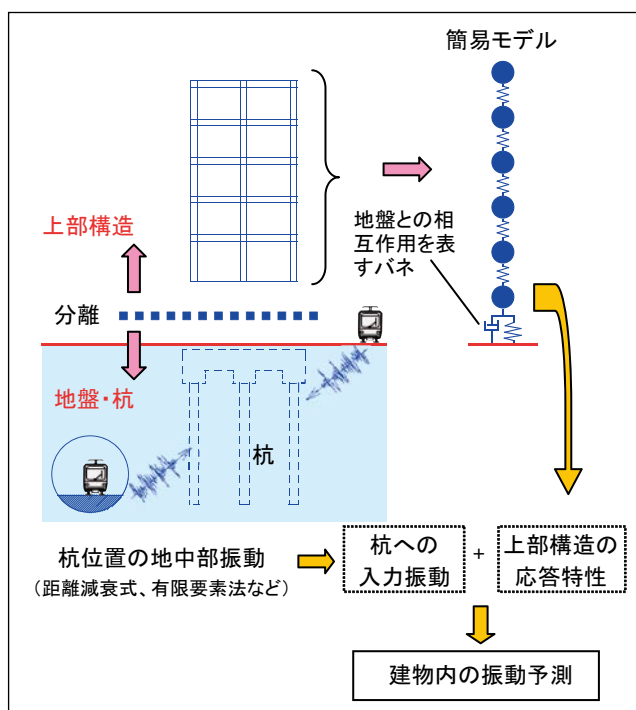


図7 地盤から建物への振動伝搬予測手法の概要

建物の振動予測への適用

実際の鉄道近接建物に対し、提案した予測手法を適用してみました。ここでは、図8に示すように、列車が地表面を走行する場合（ケースA）、高架橋上を走行する場合（ケースB）、トンネル内を走行する場合（ケースC）の3ケースを対象としました。予測に用いる地中部の振動は、ケースAとBでは二次元有限要素法、ケースCでは距離減衰式を用い、地盤から建物への振動の入力伝搬経路として杭のほか基礎梁も考慮しました。予測結果と実測結果の比較を図9に示します。ケースAでは10～25Hz、ケースBでは10～16Hzで予測値が実測値よりやや大きくなりましたが、全体的には各ケースとも概ね実測結果に対応した予測結果が得られました。

建物へ伝わる振動の低減効果の予測

沿線建物の振動対策工法の一つとして、基礎梁が地盤に接しないように発泡スチロールなどの振動遮断材が設置される場合がありますが、その効果量は地盤条件や加振源の位置などにより変動するため、予測することは容易ではありません。そこで、提案した予測手法を適用し、基礎梁への振動遮断工法の効果について定量的に推定しました。

前述したケースAの基礎梁に振動遮断材を設置した場合を想定し、遮断材により基礎梁からの振動伝搬が完全になくなると仮定したときにどれだけ建物内の振動が低減するか予測した結果を図10に示します。基礎梁側面や底面への遮断材の設置による効果は、周波数が高くなるほうが大きいため、体感振動よりむしろ固体伝搬音対策に有効なことが推測できます。また、基礎梁側面のみ遮断では効果は少なく、側面と底面の両方を遮断した場合のほうがより大きな効果が得られることも予測できます。

以上のように、本予測法を用いれば遮断材による振動低減効果についても概略の傾向を把握することができます。

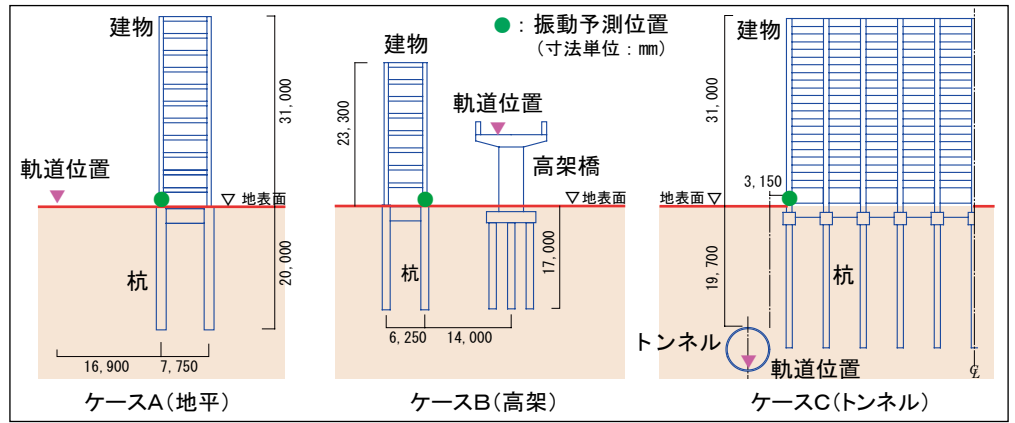


図8 振動予測対象の建物と軌道位置(断面図)

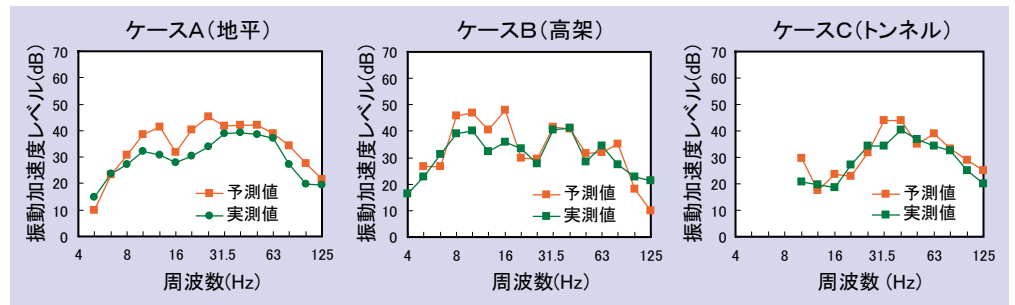


図9 実測値と予測値の比較(実大建物)

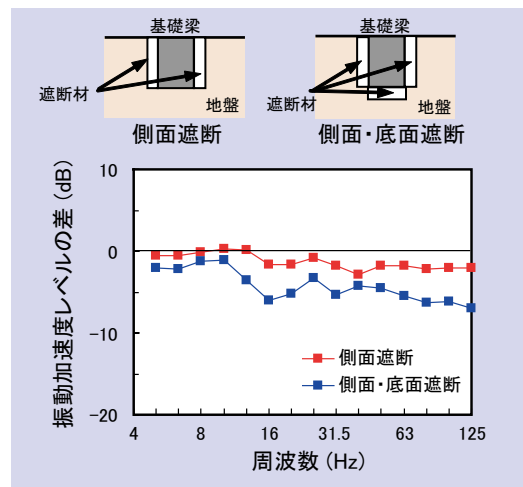


図10 基礎梁の振動遮断効果の予測例(遮断材あり-遮断材なし)

おわりに

沿線建物の鉄道振動予測において、特に重要な地盤から建物への振動伝搬に関する新たな予測手法を紹介しました。この予測手法の特徴は、地盤と建物が相互に与える影響を考慮することにより、地盤条件や基礎の形状、建物の規模等の条件に即した予測が簡便にできることです。今後も、地中部の振動推定の簡素化や予測精度の向上などに取り組んでいきたいと考えています。RRR