

鉄道トンネル上の地盤振動解析

渡辺 勉

鉄道力学研究部
(構造力学 研究員)

横山 秀史

防災技術研究部
(地質 主任研究員)

武居 泰

構造物技術研究部
(建築 研究室長)



わたなべ つとむ



よこやま ひでふみ



たけい やすし

はじめに

近年、技術開発の進展により土被り（トンネルの覆工上の土砂や岩盤等の厚さ）の薄い山岳トンネルの施工が可能となり、施工事例が増加しつつあります。このような土被りの薄いトンネルにおいては、周辺環境の地盤振動の予測と評価、およびその対策工の検討が重要となってきます。

図1に鉄道トンネルからの振動伝播の概念図を示します。一定間隔で規則正しく配置される列車の輪軸は、評価断面のレール位置を通過するたびに上下方向の力をそのレールに加えます。この輪軸からレールに伝わる規則的な力の変動が地盤振動の加振源となります。また、車輪踏面やレール上面の微小な傷（凹凸）はより高周波数帯域における加振源となります。この加振力は、締結装置により間欠的に弾性支持されたレールを介して、軌道スラブやまくらぎ等に伝わります。土被りが薄い山岳トンネルでは防振対策が施される場合が多く、軌道スラブやまくらぎは防振材により弾性支持されることとなります。つまり加振力は二重弾性支持梁を介してトンネルの底板に相当するインバートに伝わることになります。

このトンネル底面からの振動が主たる加振源となり地表面に伝播しますが、伝播経路は三次元的であり、縦波、横波、表面波となって複雑な伝わり方をします。現実の地盤の層構造や材料特性は理想的に一様な状態ではなく、この点が予測手法の確立をより困難なものとしています。実際、同一条件の地盤振動の測定結果でもばらつきがみられることが多くあります。このため、鉄道トンネル上の地盤振動解析では、実測による検証が非常に重要となってきます。

本稿では、上記問題に関する鉄道総研の二つのシミュレーション手法と、その検証方法について紹介します。

三次元相互作用解析法による地盤振動予測

実際の車両、トンネル、地盤状態に可能な限り近い条件で予測や評価を行っていかうというのが、三次元相互作用解析法です。この手法では、必要な要素は全てモデルに組み込まれますので、一見して色々な可能性を検討できるようなも思えます。しかし、前述のように地盤振動を表現するためには幾つもの解析条件やパラメータを設定しなければならず、不確定要素が多くなることから、実際に実用的

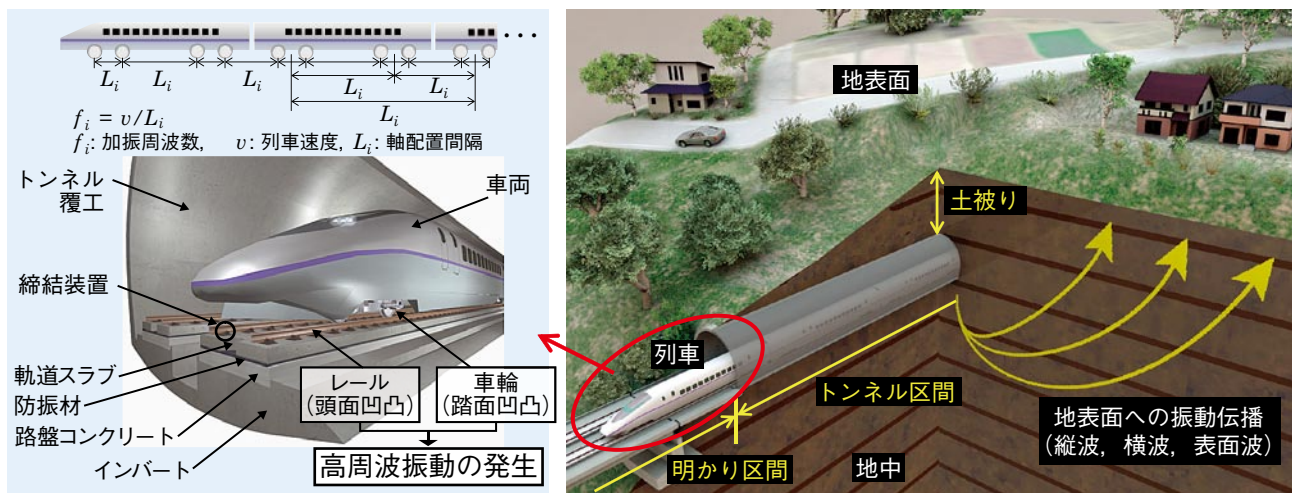


図1 鉄道トンネルから地表面への振動伝播の概要

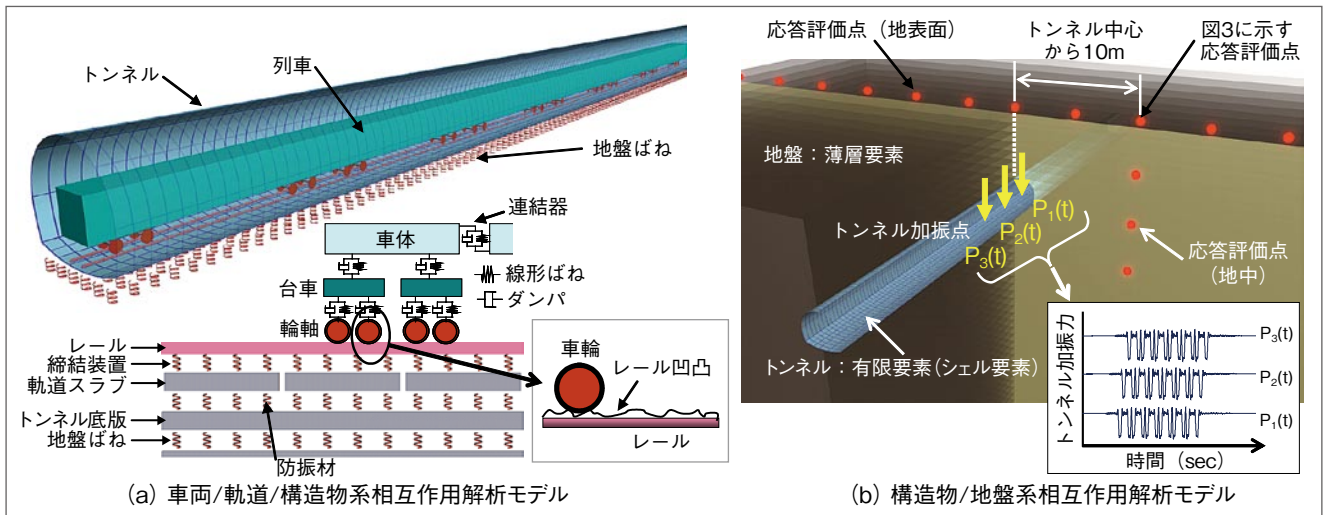


図2 三次元相互作用解析法の概要

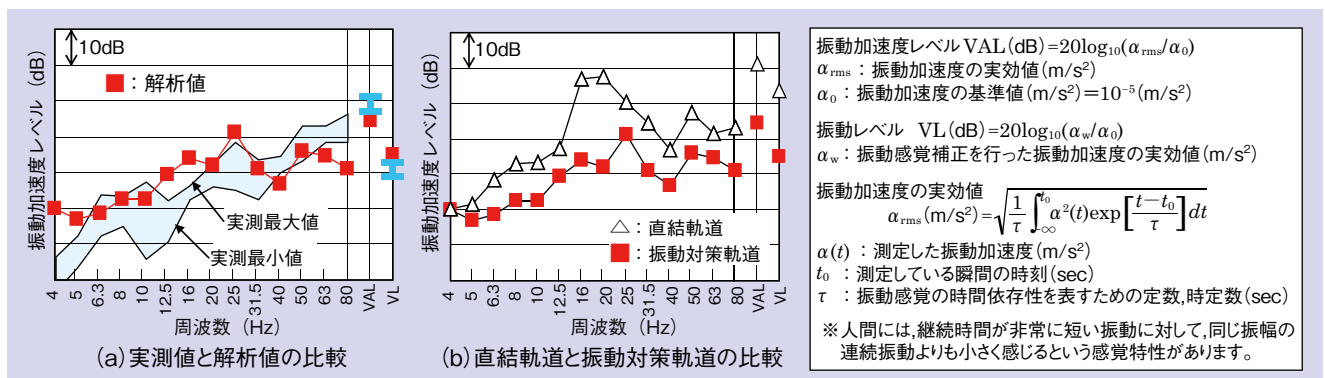


図3 三次元相互作用解析法を用いた解析結果の例(トンネル中心から10mの地表面)

な解析モデルを得るためには, 入力諸元の設定や実際の測定を用いた検証等, 多くの労力が必要となります。また, 解析規模も大きくなることから, どちらかと言うと大型計算機を用いた「数値実験」に近い解析手法となります。

図2に解析法の概念図を示します。まず車両/軌道/トンネル系三次元相互作用解析で軌道からトンネル底板への加振力を求め, 次に, これを入力値としてトンネル/地盤系三次元相互作用解析を行って地表面の応答を求めます。

車両/軌道/トンネル系三次元相互作用解析では, 車両には機構解析 (Multi Body Dynamics : MBD) モデルを用いています。MBDモデルでは, 車両は, 車体, 台車, 輪軸の構成要素に分割され, これらは個々に弾性変形しない剛体 (回転慣性質量も含む剛な質点系) として表現されます。これをばねやダンパーで三次元的に結合して, 車両を構成します。車輪とレールの間には, 両者の接触状況と軌道変位を加味した, 接触, すべり, 摩擦モデルが考慮されます。レール, 軌道スラブ, トンネルには, 有限要素 (Finite Element : FE) モデルを用いています。有限要素法 (Finite Element Method : FEM) は, 複雑な構造物を小さな簡易基本要素の集合体として表現し, 運動に関する

微分方程式を解いていく手法です。ここではレールや軌道スラブを短い梁要素の連結構造で, トンネルを小さなシェル (薄い板膜) 要素の連結構造でそれぞれ表現しています。また締結装置のばね (軌道パッド), 防振材, トンネル支持地盤ばねは, 支持面積に応じた等価なばねで表現しています。

トンネル/地盤系三次元相互作用解析では, 前の解析と同じく, トンネルはシェル (薄い板膜) 要素の連結構造としてFEモデルで表現しています。地盤は, 水平成層構造 (平行均一な地層の積層構造) と仮定して, その振動を薄層要素法 (Thin Layered Element Method) により解きます。薄層要素法は, 地盤を薄い層に分割して水平方向の層内は均質な連続体として, 深さ方向には層の分割面で離散化して解く手法です。均質な地盤であれば, FEモデルに比べて効率的に比較的高い周波数帯域まで解析することができます。トンネルへの加振力は, 図中に示すようにトンネル底面上の各点に時刻歴加振データとして与えられます。

図3に解析結果の例を示します。図は, トンネル中心から10m離れた地表面評価点 (図2) における応答加速度の時刻歴波形を振動加速度レベルに変換して表したもの

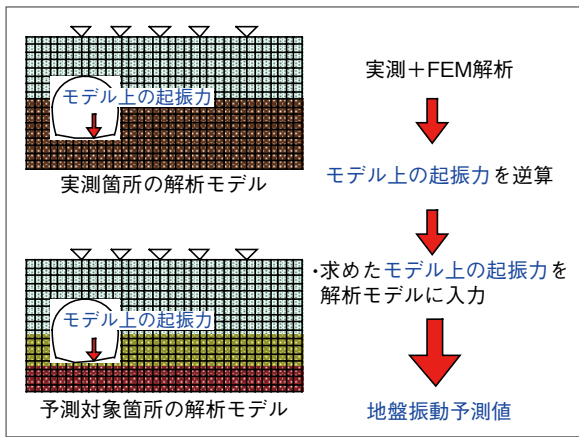


図4 等価起振力法による地盤振動予測の流れ

です。各図の横軸右端に示されている振動加速度レベル (Vibration Acceleration Level : VAL) は、人間が全身で感知できるとされている周波数範囲 (1~80Hz) の値を対数表示したものです。振動レベル (Vibration Level : VL) は、VALと同様な手法で求めています。測定した振動加速度に対して人間の振動に対する感じ方 (振幅が同じ場合でも周波数によって感じ方が異なる) を考慮した「振動感覚補正」を行って対数表示したものです。図中の横軸の周波数は、振動特性の寄与度を見るために、周波数範囲を1/3オクターブバンド (帯域) ごとに区切り振動加速度レベルを算出した場合の中心周波数を表しています。

図3 (a) で1/3オクターブバンドごとの振動加速度レベルを比較すると、概ね同一条件で実施した測定値であっても10dB程度のばらつきが生じていることがわかります。解析値は、測定値と比較的よい一致を示していますが、実務ではパラメータが多いため、このように測定値を補助手段として用いて精度を確保し、様々な可能性について解析的に検討していくこととなります。図3 (b) は、精度検証されたモデルを用いて防振スラブ軌道の効果を確認した一例で、防振スラブ軌道は、振動レベルで10dB以上低減効果があったものと推定されます。このように、三次元相互作用解析法の利点は、ある程度精度が検証されたモデルを拡張して、実際には簡単に試験できない、車両諸元、軌道変位、各種防振軌道、トンネル構造等のパラメータ変更の影響度を予測できる点にあると言えるでしょう。

等価起振力法による地盤振動予測

新たに建設されるトンネルの上で発生する地盤振動を予測する時、「知りたい場所と似たような場所」の地盤振動を測定し予測値を求める方法がしばしば使われています。この方法は一見簡単そうに見えますし、実際の振動データにもとづく予測であるという信頼感があります。しかし、地盤振動に関わる条件 (列車、軌道、トンネル、地質等)

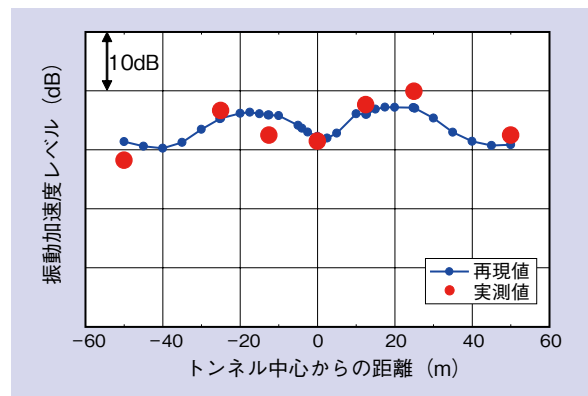


図5 振動の再現値と実測値の比較例 (63Hz帯域)

は非常に多い上、どの条件がどの程度似ていれば適切な予測ができるのかという判断基準がないので、本当に「似たような場所」なのか確認することが困難な場合があります。また、場所を選ぶときの条件を厳密にしすぎると、測定できる所が一箇所も見つからないということもあり得ます。

このような点を緩和する方法として、鉄道総研では実測と解析の組合せにより地盤振動を予測する、等価起振力法という方法を提案しています。等価起振力法は、実測した場所と予測したい場所のトンネル構造や地質条件等の違いを、二次元動的FEM解析により補正する方法といえます。図4に等価起振力法による地盤振動予測の流れを示します。

等価起振力法による地盤振動予測を行う時には、まず予測したい場所と車両や軌道の条件が似ている場所で地盤振動を測定します。その際、1点だけではなく複数の位置 (例えばトンネルの真上、12.5mあるいは、25m離れた位置等々) で地盤振動測定を実施します。あわせて、測定した場所を対象にFEM解析を行い、軌道直下に単位の力が働いたときに各測定点に生じる振動を計算します。

求めたFEM解析結果を実測値と比較することで、実測値を再現するために、単位の力の何倍の力を起振力としてモデルに入力しなければならないのか計算できます。この計算を全測定点に対して行い、測定点ごとに得られた起振力の平均をとることで、モデルに入力すべき起振力 (等価起振力) が得られます。FEM解析モデルや等価起振力の良し悪しは、得られた等価起振力を用いて求めた振動値と実測値の誤差の大小で判断できます。図5に振動の再現値と実測値の比較例を示します。

このようにして求めた等価起振力を入力として予測したい場所のFEM解析を行うことで、地盤振動の予測値を得ることができます。

等価起振力法を用いることで、トンネル構造や地形、地質等FEM解析で計算できる条件については、実測する場所の選定条件を緩くすることができます。新幹線等車両や軌道の条件がある程度そろっている場合には、あらかじめ

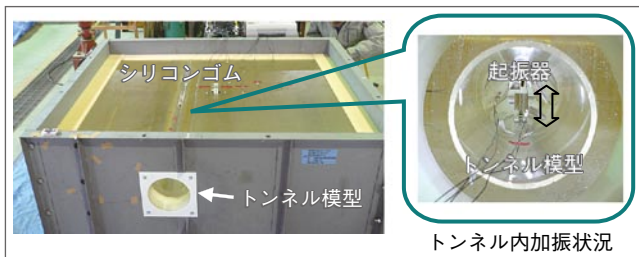


図6 シリコン地盤模型実験

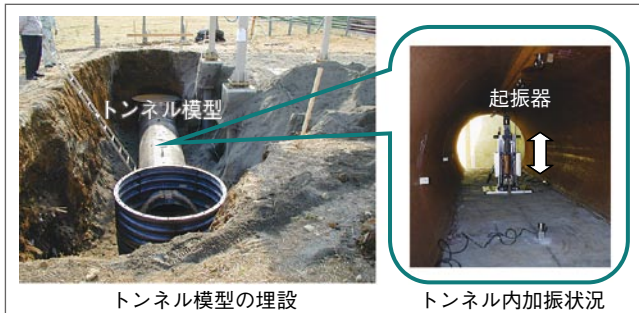


図7 地盤-トンネル系模型実験

多くの場所で測定をおこなって平均的な等価起振力を求めておくことで、測定場所によるばらつき等を考慮した予測を行うことができます。

シミュレーションを検証するための実験・現地測定

シミュレーションの検証や精度の確認を行うため、様々な模型実験や現地測定を実施しています。そのうちのいくつかを紹介します。

図6は縮尺1/50の模型で、シリコンゴムで地盤を作成し、その中にアクリル製のトンネル模型を埋設しています。トンネル内を加振することにより、トンネルから地盤への振動伝播を詳細に把握することができます。また、比較的規模の大きな模型実験として、図7に示すように実地盤の中に縮尺1/5程度鋼製のトンネル模型を埋め込み、トンネル内に設置した起振器により加振実験を行っています。縮小模型実験を重力場で実施すると、シリコンゴムのような特殊材料を用いないと模型と実物の相似則を合わせることが難しくなります。そこで、図8に示す遠心模型実験により、縮尺に見合うように遠心力を模型に作用させながらトンネル内を加振する新たな実験手法を開発しています¹⁾。

実際の地盤振動を現地で測定することも、シミュレーションの検証のためには必要です。より詳細なデータを得るため、地表面だけでなくトンネル内や地中部の振動も同時に測定しています(図9)。トンネル近傍の地表面や地中部の振動について、現地測定結果と解析結果を比較した例を図10に示します。解析手法は等価起振力法で用いている二次元FEMですが、誤差は概ね ± 5 dBの範囲に入っていることがわかります。

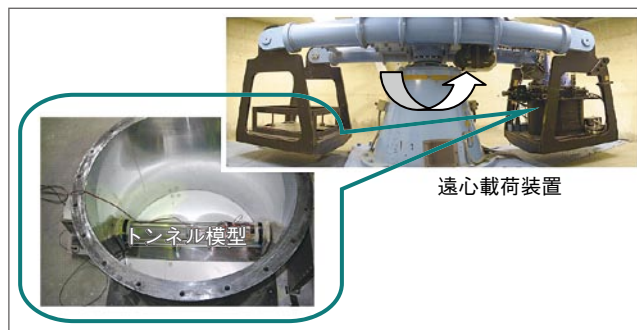


図8 遠心模型実験

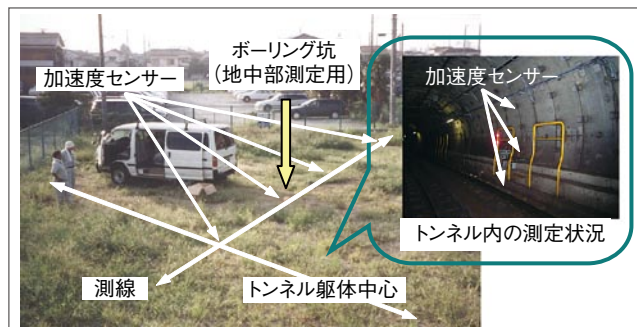


図9 トンネル振動の現地測定

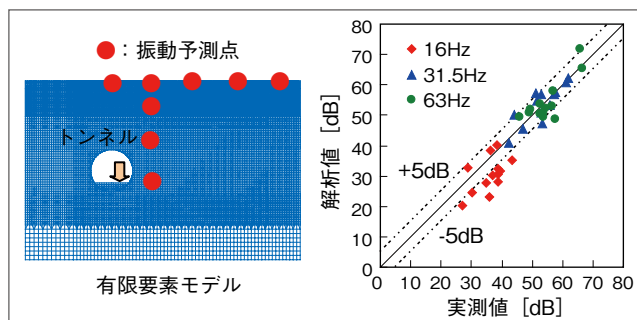


図10 現地測定とFEM解析による振動加速度レベルの比較

模型実験や現地測定は、シミュレーション精度の確認や、より精度の高いシミュレーション手法の開発にも役立っています。

まとめ

鉄道総研のシミュレーション技術やその検証方法について紹介しました。鉄道トンネルの地盤振動シミュレーションにおいて特徴的なのは、現地測定データによる検証や補正の役割が非常に大きいことです。今後とも、本稿で紹介した各手法の特徴を生かしつつ、様々な問題に取り組んでいきたいと考えます。本稿の研究内容の一部は、独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備機構からの委託研究として行われました。RRR

文献

- 1) 津野究ほか4名：遠心模型実験により把握した地下鉄振動の伝播性状，土木学会論文集C，Vol.63，No.1，pp.13-23，2007