

鉄道トンネルにおける振動対策軌道に関する研究

鉄道総研 正会員 ○渡辺 勉
 鉄道総研 正会員 横山秀史
 構造計画研究所 正会員 庄司正弘

鉄道総研 正会員 曾我部正道
 鉄道運輸機構 正会員 山崎貴之
 構造計画研究所 正会員 島袋ホルヘ

1. はじめに 列車の高速化や新線建設にともなう沿線環境保全のために、列車走行により発生する振動を低減させるための対策軌道が開発されている。本研究では、新幹線トンネル上の地盤振動に対して、各種振動対策軌道の影響を数値解析により評価するため、列車走行による地盤振動を解析できる地盤-トンネル構造物系の三次元数値解析モデルを構築した。また、本解析モデルの妥当性を検証するために、既設新幹線トンネル上の地盤における実測記録との比較を行った。なお、トンネル内の軌道構造は、弾性まくらぎ直結軌道(A地点、土被り5.5m)および防振スラブ軌道(B地点、土被り9.2m)の2箇所、列車速度は260km/h程度である。

2. 三次元数値解析モデルの構築 解析手法の概要を図1に、構築した解析モデルの概要を図2および表1に示す。列車走行によって発生する地盤振動を適切に再現するためには、ある程度の軌道延長を持った解析モデルが必要となる。また、軌道構造の違いが地盤振動に与える影響を評価するためには、軌道構造まで詳細にモデル化する必要があるとともに、列車荷重として非振動系の定荷重列ではなく、車両と軌道構造との動的相互作用を考慮することも必要となる。しかし、地盤-トンネル構造物系モデルに加えて車両-軌道構造系までモデル化すると、モデル規模が膨大になり実用的ではない。そこで本研究では、地盤-トンネル構造物系と車両-軌道構造系を別々にモデル化し、後者を前者への入力とすることで解析の効率化を図った。使用プログラムは、車両-軌道構造系には車両と構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS II、地盤-トンネル構造物系には地盤と構造物の動的相互作用解析プログラム SuperFLUSH/3D である。DIASTARS II による解析モデルでは軌道構造はレール節点間隔の1/5の長さまで細かく節点を設けるが、トンネル躯体および地盤は実物と等価なはり要素およびばね要素を用いた簡易な三次元格子モデルとした。SuperFLUSH/3D による解析モデルでは、計算時間などの実際上の制約から、軌道構造およびトンネル支保部材はモデル化せず、トンネル躯体はシェル要素で、地盤は薄層要素でモデル化した。解析モデル延長は150mで、解析周波数は100Hz、地盤の減衰は2%である。

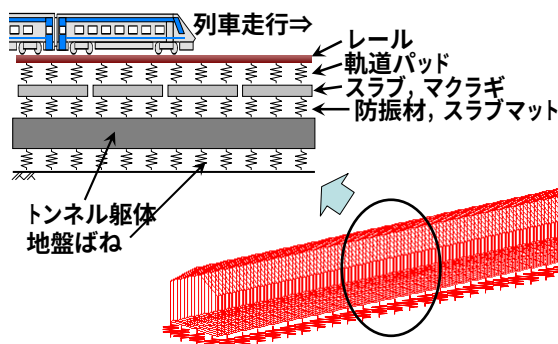
3. 解析手順 まず、図2(a)に示す DIASTARS II で構築した三次元格子モデルにおいて、列車走行時の防振材のばね反力を時間領域で計算する。次に、図2(b)に示す SuperFLUSH/3D で構築した三次元モデルに軌道上の加振点(レール節点)から地盤の各応答評価位置までの伝達関数を地盤-トンネル系全体モデルにおける加振解析によって計算する。ここで求めた伝達関数に、防振材のばね反力の時刻歴データをフーリエ変換したものを掛け合わせるにより、周波数領域での応答が求められる。これをフーリエ逆変換することによって応答評価位置での時間領域での応答が求められる。

車両と構造物の動的相互作用
 解析プログラム DIASTARS II
 車両と軌道構造を詳細にモデル化
 トンネル加振力を作成

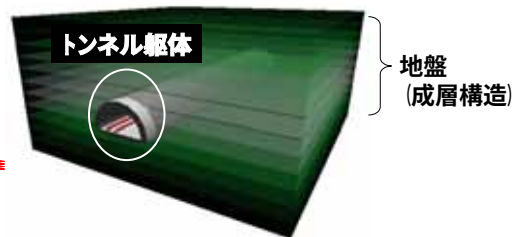
地盤と構造物の動的相互作用
 解析プログラム SuperFLUSH/3D
 トンネル構造物を有限要素、
 地盤は薄層要素でモデル化

応答評価

図1 解析手法の概要



(a) DIASTARS II



(b) SuperFLUSH/3D

図2 解析モデルの概要

表1 モデルに使用した要素					
(a) DIASTARS II				(b) SuperFLUSH/3D	
部材	要素	部材	要素	部材	要素
レール	はり	防振材	ばね	トンネル	シェル
軌道パッド	ばね	トンネル	はり	躯体	
スラブ	はり	躯体		地盤	薄層
マクラギ	質点	地盤	ばね		

SuperFLUSH/3D による地盤応答解析では、加振点をトンネル路盤コンクリートにあたる部分に複数設けそれらに位相差を付けて加振すること(位相差加振)によって、列車走行による地盤応答を再現することとした。また、解析効率の向上を目的として、トンネルの構造的な連続性を考えて、加振点はレール全節点ではなくモデル中央の一部の節点とし、解析上の測定点を地盤上に複数設けておき、位相差加振による各測定点の応答を時間のずれを考慮してそれぞれ足し合わせることにによって、列車が走行した際の応答評価位置での応答を求めている。具体的には、図3に示すように、加振点Aに対する測定点2の応答 R_{A2} は、加振点Bに対する測定点3の応答 R_{B3} と等価である。すなわち、 R_{A2} と R_{B3} は等しくなり、同様に R_{C2} と R_{B1} は等しい。したがって、列車が速度 V で $A \Rightarrow B \Rightarrow C$ と進んだときの測定点2の応答 $R_2(t)$ は、次式で表されることになる。

$$R_2(t) = R_{A2}(t) + R_{B2}(t) + R_{C2}(t) = R_{B3}(t - \Delta t) + R_{B2}(t) + R_{B1}(t + \Delta t)$$

実際の SuperFLUSH/3D で構築した解析モデルでは、図4のようにトンネル中央を加振し、地盤上の測定点を数多く設けた。なお、本手法について、別サイトでの実測結果¹⁾との比較により、手法の妥当性を確認している。

4. 解析結果 A地点およびB地点における解析結果と実

測結果を図5に、解析に使用した物性値を表2に示す。実測結果と解析結果の整合を図るために、既往の研究²⁾を参考に、軌道パッドのばね定数および防振材のばね定数は、公称値よりも大きい値を用いた。また、地盤やトンネル躯体等の材料物性値はボーリング調査から得られた値および標準的な値を用いた。B地点では両者が概ね一致する結果となったが、A地点では、解析結果の方が小さくなる周波数帯が存在した。

5. まとめ 実測結果との

比較により、本解析モデルの妥当性を検証することができた。A地点については土被りが小さいため、地盤とトンネルとの境界条件等についてさらに検討する必要があると考えられる。また、加振力作成の際の減衰定数、軌道パッドおよび防振材のばね定数が地盤応答に大きく影響することがわかった。本解析の場合では、減衰定数は32Hz以上、ばね定数は16Hz以下の周波数帯の応答に影響を及ぼしていた。今後は加振力の精度向上のために、これらのパラメータに関する分析を進めるとともに、地盤の伝達特性の分析を進め、実現現象をより忠実に再現できる三次元数値解析モデルを構築し、トンネル内に振動対策軌道を敷設したときの振動低減効果について定量的に検討していきたいと考えている。

参考文献 1) Takemiya H: Simulation of track-ground vibrations due to high-speed train: the case of X-2000 at Legsgard, Journal of Sound and Vibration 261, p503-526, 2003

2) 守田武史, 田中靖幸, 廣本勝昭, 横山秀史, 岩田直泰: 低ばね定数軌道パッド敷設による地盤振動に対する影響, 土木学会第60回年次学術講演会, 2005.9

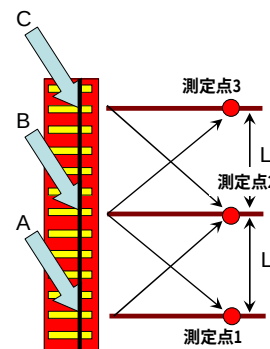


図3 加振点と応答の関係

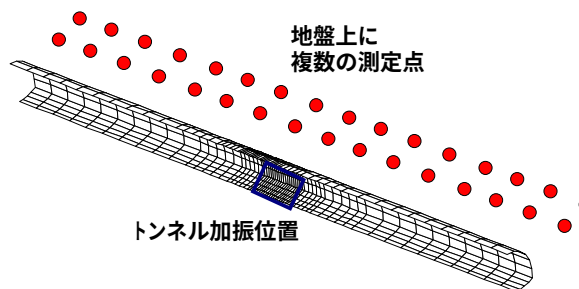


図4 トンネル加振位置の概要

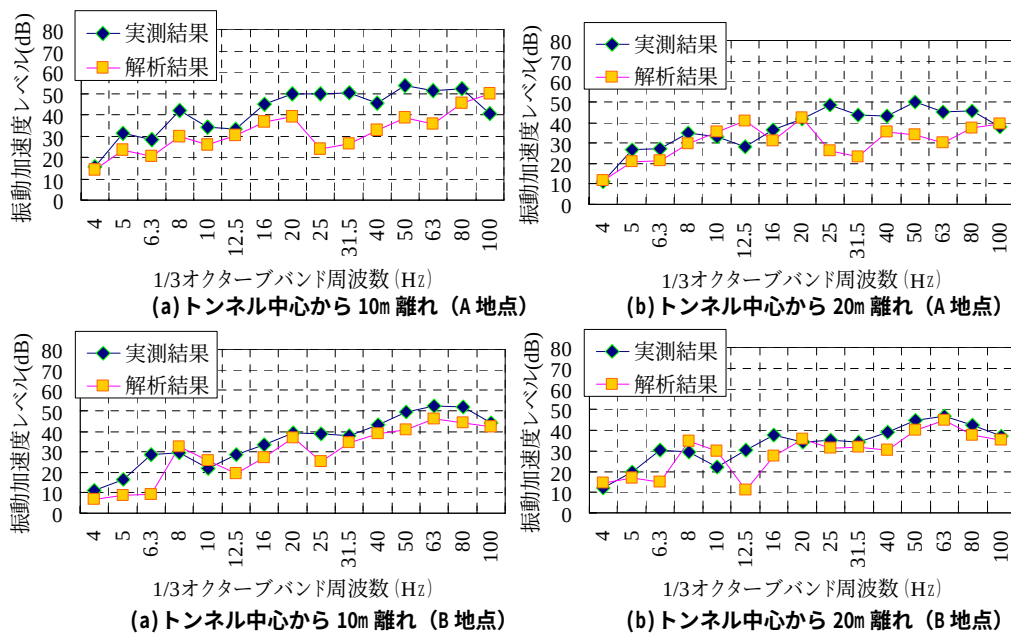


図5 振動加速度レベルの実測結果と解析結果の比較

表2 解析に使用した物性値

部材	公称値	解析使用物性値
軌道パッド	60MN/m	180MN/m (3倍)
防振材	30MN/m	120MN/m (4倍)
スラブマット	35kN/cm	公称値と同値

※スラブマットばね定数は100mm×100mm×25mm試験体から得られたばね定数である。