# 3604 高速鉄道トンネル上の地盤振動解析

正	[土]	○渡辺	勉	(鉄道総研)	正 [土]	曽我部	正道	(鉄道総研)
Æ	[土]	橫山	秀史	(鉄道総研)	正 [土]	芦谷	公稔	(鉄道総研)
Æ	[土]	米澤	豊司	(鉄道・運輸機構)	正 [土]	清田	三四郎	(鉄道・運輸機構)

# Analysis of Train-Induced Ground Vibration from Tunnel

Tsutomu WATANABE, Masamichi SOGABE, Hidehumi YOKOYAMA, Kimitoshi ASHIYA, Railway Technical Research Institute Toyoji YONEZAWA, Sanshiro KIYOTA, Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency

We developed 3D dynamic interaction analysis method that was able to model entire system including the vehicle, the track, the structure and the ground. We conducted ground vibration analyses that ground properties and track structure were assumed to be analytical parameters. As a result, under the condition of this analysis, it became apparent that ground vibration decreased by 25 dB when Vs (shear wave velocity of ground) became 1.3Vs. On the other hand, it increased by 15 dB when Vs became 0.7Vs. Moreover, we made clear the vibration reduction effect of vibration reduction track.

Keywords: train-induced ground vibration, tunnels, 3D numerical analysis, depth of overburden

### 1. はじめに

鉄道における地盤振動は、振動が車両から軌道、構造 物、地盤へと伝播する現象である.しかしながらその伝 播過程を数値解析により再現しようとすると、多くの困 難が伴う.その理由としては、伝搬過程に多くのパラメ ータが介在すること、高周波数振動の伝播を遠方まで考 慮することができる大規模な解析モデルが必要となるこ と等が挙げられる.このため、地盤振動の絶対値を解析 的に精度良く予測する手法は、現在までのところ開発さ れておらず、実務における地盤振動の予測は、実測に基 づく統計的予測式や、実測を援用した数値解析等によっ て実施されている<sup>1)</sup>.

このような実測に基づく手法は、実務では簡便かつ有 効なツールであり、例えば有限要素法等により等価起振 力を求め、これを用いて他地点の地盤振動を予測する手 法等は、既に多くの実績を重ねている.一方、過去に適 用事例がなく、実測のデータが蓄積されていない車両、 軌道、構造物形式等を条件とする場合は予測が困難とな る.

このような背景から筆者らは、上記の従来手法の課題 を補完する手法として、車両、軌道、構造物、地盤のそ れぞれの物性に関する情報を積み上げ、地盤振動の伝播 経路の全体系を三次元的にモデル化し、地盤振動を解析 的に予測する手法を開発することとした.この手法は、 入力パラメータが多岐に渡るため、従来予測手法や実測 との併用が不可欠となるが、各構成要素を任意にモデル 化できるため、実際には再現が困難な様々な数値実験が 可能となる.以下に本研究の目的を示す.

- (1) 高速鉄道トンネル上の地盤振動を対象とし、車両、 軌道、構造物、地盤の影響を任意に考慮することが できる三次元動的相互作用解析手法を構築する。
- (2) 上記数値解析法に関して各種パラメータが地盤振 動に与える影響を評価する.

#### 2. 解析手法

#### 2.1 解析手法の概要

本研究では、土被り 9.2m、インバートの底面深さ 19m

の高速鉄道トンネルを解析対象とした.当該トンネルに は防振直結軌道が敷設されており,列車通過速度は 200 ~250km/h である.

前述のように、列車通過に伴う解析対象トンネル上の 地盤振動を数値解析により精緻に再現しようとすると、 任意の構造形式を扱うことができる大規模な解析モデル が必要となる.しかしながら現状の計算機能力は、この ような大規模モデルで実用的な解を得るレベルには至っ ておらず、何らかの工学的な近似が必要となる.

図1に本研究で開発した三次元数値解析手法の概要を 示す.本研究では、車両/軌道/トンネル系の解析モデル から加振力を求め、これを、トンネル/地盤系モデルに入 力して地盤振動を予測する手法を採用した.

車両/軌道/トンネル系の解析には、車両と構造物の動 的相互作用解析プログラム DIASTARS II<sup>2)</sup> を用いた.ト ンネルは、適切な地盤ばねで支持しモデル化されている. このため、算出される加振力は、全体系において相互作 用力を考慮して算出したものと等価とみなせる.

トンネル/地盤系の解析には地盤と構造物の動的相互 作用解析プログラム SuperFLUSH/3D を用いた.ここで使 用する加振力は,既に車両/軌道との相互作用を加味した 値であるため,擬似的に全ての相互作用力を考慮した数 値解析が行われていると考えてよい.

#### 2.2 車両/軌道/トンネル系解析

表1(a)に車両/軌道/トンネル系の解析で使用した有限要素を、表2及び表3にトンネル及び地盤の物性値を示す.車両は、車体、台車、輪軸を剛体質点でモデル化し、それらをばねとダンパでリンクさせた1車両31自由度のMulti Body Dynamics モデルとした<sup>2)</sup>.レールは、はり要素によりレール締結間隔の1/5 間隔で節点を設けてモデル化した.まくらぎ又は軌道スラブははり要素でモデル化した.糸結装置及び軌道支持ばね(CAモルタル又は防振材)はスカラばね要素によりモデル化した.トンネル駆体ははり要素による格子モデルとした.トンネル支持地盤ばねはスカラばね要素でモデル化した.車輪/レール間の構成則としては、鉛直方向には*Hertz*の接触ばねを、水平方向には*Kalker*の線形クリープ理論をそれぞれ

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕





図1 三次元動的相互作用解析法の概要

(b) トンネル/地盤系解析表2 地盤物性値

	衣 I (a) DIA:	STARS II	に用した	.要系 (b) SuperFL	USH/3D
部材	要素	部材	要素	部材	要素
レール	はり	防振材 CA モルタル	ばね	トンネル	シェル
軌道パッド	ばね	トンネル	1.4.10	邪14	
スラブ	はり	躯体	120	地盤	薄層
まくらぎ	質点	地盤	ばね		

用いている.

数値解析には、モーダル座標系において車両と構造物 の運動方程式を連立させて解く手法を用いた.ただし、 両者に非線形項が存在するため、Newmarkの平均加速度 法により、Δt内で反復計算を行った。

本解析における列車通過時の軌道支持ばね要素の時刻 歴反力波形が、次節のモデルの加振力となる.

# 2.3 トンネル/地盤系解析

表1(b)にトンネル構造物/地盤系の解析で使用した要素を示す.本解析モデルでは、トンネル躯体はシェル要素で、地盤は薄層要素<sup>3)</sup>でそれぞれモデル化した.モデルの延長及び深さはそれぞれ 150m とした.解析周波数は 100Hz,減衰定数は 2%とした.

図2に SuperFLUSH/3D の解析モデルを示す.本解析に おいては、トンネルのインバート部に加振点を複数設定 し、そこから地盤の応答測定点までの伝達関数を計算し た.前述の加振力を周波数領域に Fourier 変換し、それ をこの加振点/応答測定点間の伝達関数に乗じることに より、周波数領域での評価点の応答を得た.これを Fourier 逆変換することによって応答測定点での時間領 域での応答を求めた.

トンネルインバート部の加振点は、軌道とトンネルの 構造的な周期性を考慮すると、レール全節点ではなくモ デル中央の同一軌道構造の繰り返し単位に減じることが できる.解析上の測定点を地盤上に複数設けておき、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 せることによって、列車走行時の応答を擬似的に再現す ることができる.

図3に加振点と測定点の関係を示す.ここで、構造が 均一であれば、加振点Aに対する測定点2の応答 R<sub>42</sub>は、 加振点Bに対する測定点3の応答 R<sub>B3</sub>と等価である.す なわち、R<sub>42</sub>と R<sub>B3</sub>は等しくなり、同様に R<sub>C2</sub>と R<sub>B</sub>は等 しい、列車が速度 V でΔ1単位にA、B、C と進んだとき

層	土質区分	深さ <i>D</i> (m)	N 値	単位体積 重量 ア(kN/m <sup>3</sup> )	Vs (m/s)	減衰 定数 h(%)
1	砂質粘土	0.0~2.2	6	18	145	2.0
2	シルト (地下水位以浅)	2.2~5.6	7	19	191	2.0
3	シルト (地下水位以深)	5.6~5.8	7	19	191	2.0
4	砂質粘土	5.8~14.7	7	18	153	2.0
5	砂質粘土	14.7 以深	36	19	264	2.0

表3 トンネル物性値

	厚さ <i>T</i> (m)	弹性係数 E (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比 ッ	単位体積 重量 ア(kN/m <sup>3</sup> )	減衰 定数 h(%)
覆工	0.50	24.2	0.2	23	3.0
インバート	0.45	24.2	0.2	23	3.0



図2 SuperFLUSH/3D の解析モデル



図3 加振点と測定点の関係

の測定点2の応答 R2(1)は、式(1)で表すことができる.

$$R_{2}(t) = R_{A2}(t) + R_{B2}(t) + R_{C2}(t)$$
  
=  $R_{B3}(t - \Delta t) + R_{B2}(t) + R_{B1}(t + \Delta t)$  (1)

本手法の妥当性については,実測結果<sup>4</sup>が得られてい る別サイトの解析によっても、検証されている.



3. 解析結果

#### 3.1 基本性状の把握

図4に各測定地点における 1/3 オクターブバンドごとの振動加速度レベルの解析結果を示す.比較のため,実測結果も併せて示した.実測は圧電型加速度計(PV-87 及び PV-85)を用いて得られたものである.実測は、そのばらつきを考慮して,数列車の測定における平均値, 最大値及び最小値で示した.

解析結果は、一部の周波数帯で実測の最大-最小値の 範囲から外れるものが見られるが、概ね実測の範囲内に 収まっている.よって本解析手法により当該トンネル上 の地盤振動の基本性状をある程度再現可能であることが 分かった.本解析結果を基本ケースとして、以降の節で 各パラメータの影響を論じる.

#### 3.2 地盤のせん断波速度 V<sub>s</sub>の影響

図5に地盤のせん断波速度 V<sub>s</sub>(以降, V<sub>s</sub>という)が地 盤振動に与える影響を示す.ある N値に対して V<sub>s</sub>が非常 にばらつくこと<sup>5)</sup>を考慮して,表2に示した V<sub>s</sub>を 1.3 倍 及び 0.7 倍としたものを設定した.基本ケースと比較す ることにより, V<sub>s</sub>を 0.7 倍にすると地盤振動が増加して いることがわかる.増加傾向は特定の周波数帯ではなく すべての周波数帯でみられる.また, V<sub>s</sub>を 1.3 倍とする と地盤振動が減少することがわかる.特に低周波数側で その傾向が強い.本解析の条件下では、 V.を1.3倍及び 0.7倍すると-15dB~25dB程度変動することがわかった.

# 3.3 地盤の減衰定数の影響

図6に地盤の減衰定数hが地盤振動に与える影響を示 す.減衰定数hを5%にしたものを設定した.基本ケー スと比べると、減衰定数hを5%にすると周波数ごとに 異なるが最大で応答が20dB程度低減する周波数帯が見 られた.

#### 3.4 軌道構造の影響

図7に軌道構造が地盤振動に与える影響を示す.前述 の通り,解析対象区間には防振直結軌道が敷設されてい る.その比較対象として,防振材のばね定数を直結軌道 と見なせるまで十分に硬くしたものを設定した.両者を 比較すると直結軌道では,10Hz以上の周波数帯で振動が 5~25dB程度増加しており,当該区間に防振直結軌道を 敷設したことによる効果を確認できた.一方,10Hzより 低い周波数帯では、ほぼ同程度の応答となっていること がわかる.

#### 4. 結論

本研究により得られた知見を以下に示す.





- (1) 車両、軌道、構造物、地盤の全体系をモデル化可能 な三次元動的相互作用解析手法を構築し、実現象を 概ね再現可能であることを確認した。
- (2) 地盤の物性及び軌道構造をパラメータとして地盤 振動解析を行った結果、本解析における限られた条件下であるが、せん断波速度 V,を 1.3 倍及び 0.7 倍すると-15dB~25dB 程度地盤振動が変動すること、 減衰定数を 2%から 5%にすると最大で応答が 20dB 低減する周波数帯が見られることを確認した.また、 防振直結軌道と直結軌道を比較すると、防振直結軌 道により 10Hz 以上の周波数帯で 5~25dB 程度地盤 振動が低減されていることがわかった.

本研究は,独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援 機構からの委託研究として行われた.

#### 参考文献

- 吉岡修:等価起振力法による地盤振動の予測解析, 鉄道総研報告, Vol.10, No.2, pp.41-46, 1996.
- 2) 涌井一,松本信之,松浦章夫,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.129-138, 1995.

- 田治見宏,下村幸男:3次元薄層要素による建物-地盤系の動的解析,日本建築学会論文報告集,第243 号,pp.41-51,1976.
- 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, pp.503-526, 2003.
- 5) 今井常雄, 殿内啓司: N値と S 波速度の関係および その利用例, 基礎工, pp.70-76, 1982.