

# 地下鉄列車走行下における半無限成層地盤の 振動応答解析

阿部和久 会員 新潟大学工学部  
加藤宏輝 学生員 新潟大学大学院自然科学研究科  
古田 勝 会員 東京都交通局

## 1. はじめに

列車走行に伴い発生する地盤振動を対象とした、3次元(2.5次元)モデルに基づく数値解析事例が、近年国内外において多く報告されるようになって来ている。しかし、地下鉄道の場合のようにトンネル内の列車走行に対する地表面応答の解析は、二次元解析がほとんどであり、3次元的手法に基づくものは極めて少ない<sup>1)</sup>。本研究では、一定形状の分布荷重がトンネル内を走行する場合を対象に、トンネルと半無限成層地盤との2.5次元連成振動解析を行い、トンネル深さ・走行速度が地表面応答に及ぼす影響について検討する。

## 2. 解析対象

解析対象としたトンネル・地盤の概要および設定した物性値を図-1に示す。トンネルはシールドトンネルを想定し、内径3.1m、厚さ25cmの円筒体で与え、地盤は厚さ8mの表層地盤を有する半無限場により与えた。シールドトンネルの物性値は、過去の測定結果と三次元解析結果<sup>2)</sup>を参考に、せん断弾性係数を1435MPa、ポアソン比を0.26、質量密度を2300kg/m<sup>3</sup>に設定した。なお、トンネル地盤共に減衰定数は0.05とし、複素剛性により与えた。また、走行荷重は車輪・レール・まくらぎから成る連成系の解析結果より得られたまくらぎ反力の分布に基づき設定した。一台車相当の分布荷重を図-2に示す。

## 3. 解析手法・解析条件

3次元動弾性問題の変位解  $\mathbf{u}(x, \bar{\mathbf{x}}, t)$  は次の運動方程式で与えられる。

$$\mathbf{L}\mathbf{u} - \rho\ddot{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

ここで  $\bar{\mathbf{x}} = (y, z)$ 、 $\mathbf{L}$  は空間座標に関する微分作用素、 $\rho$  は質量密度、 $(\cdot) = \partial/\partial t$  である。一定形状で分布する荷重  $\mathbf{P}$  が  $\omega_0$  で振動しながら一定速度  $c$  で移動するものとする。この時、分布荷重  $\mathbf{P}$  は次式で表すことができる。

$$\mathbf{P} = e^{i\omega_0 t} \bar{\mathbf{P}}(\xi, \bar{\mathbf{x}}) \quad (\xi = x - ct) \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\mathbf{p}}$  は分布荷重モード、 $\xi$  は速度  $c$  で荷重と共に移動する座標である。このとき、定常変位解  $\mathbf{u}$  は次式のように与えられる。

$$\mathbf{u} = e^{i\omega_0 t} \mathbf{U}(\xi, \bar{\mathbf{x}}) \quad (3)$$

式(3)を式(1)に代入し、 $\xi$  について Fourier 変換すると次の方程式を得る。

$$\hat{\mathbf{L}}\hat{\mathbf{U}} + \rho(\omega_0 + ck)^2 \hat{\mathbf{U}} = 0 \quad (4)$$

式(4)の解  $\hat{\mathbf{U}}$  は、式(1)の  $(x, t)$  に関する Fourier 二重変換に対する、 $\omega = \omega_0 + ck$  上での解として与えられる。 $\hat{\mathbf{U}}$  が求められれば、 $\mathbf{u}$  は次の逆 Fourier 変換(2.5次元解析)により与えられる。

$$\mathbf{u} = \frac{e^{i\omega_0 t}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\mathbf{U}}(k) e^{ik\xi} dk \quad (5)$$

トンネル・地盤系の応答解析は2.5次元解析法に基づき実施する。トンネル長手方向( $x$ 軸方向)に Fourier 変換し、波数空間における  $y-z$  面の準2次元問題を得る。この準2次元問題において、トンネルおよび地盤上層部を有限要素で、それ以外の地盤を境界要素で離散化した。なお、問題の対称性により、 $y \leq 0$  の部分を解析対象とした。有限要素領域は  $(-80\text{m} < y < 0\text{m})$  の範囲にとり、打ち切り端には粘性境界を設定した。2.5次元解析では、一車両の長さを20mとし、一車両分(2台車分)の分布荷重を図-2に基づき規定した。その下で、トンネル長手方向の周期長を20mとし、列車が無限に連結されている状態を設定した。なお、地下鉄のトンネル地盤系の主要な振動数成分は30~70Hzであるとされている。そこで、以下では上述の分布荷重モードが40Hzで振動しつつ一定速度  $c=15, 100\text{m/s}$  で走行する場合について、トンネル中心の深さ  $L=15, 30\text{m}$  の各ケースを対象に解析を行った。

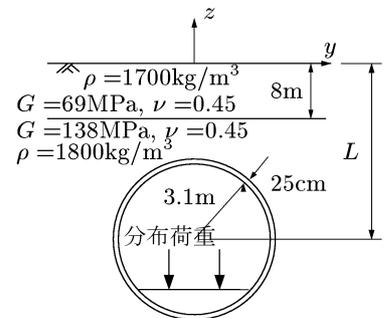


図-1 トンネル・地盤の解析条件

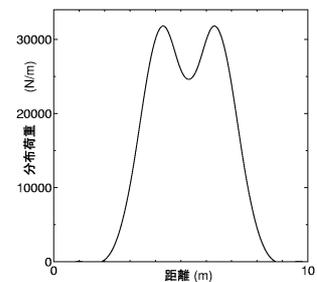


図-2 走行荷重の分布形状

Key words : 振動, 鉄道, トンネル, 2.5次元解析

連絡先 : 〒 950-2181 新潟市五十嵐二の町 8050 番地 TEL (025) 262-7028 FAX (025) 262-7021

## 4. 解析結果

### (1) トンネル深さの影響

荷重走行速度 15m/s の下、トンネル深さ  $L=15\text{m}, 30\text{m}$  に対して得られた地表面の鉛直変位振幅を図-3 に示す。なお、これらの図はトンネル長手方向に一周期区間 ( $-10\text{m} \leq x \leq 10\text{m}$ ) について、トンネル直上 ( $y=0$ ) から 60m 離れた地点 ( $y=-60\text{m}$ ) までの領域での応答を描画したものである。また、トンネル内を走行する車両中心は  $(x,y)=(0,0)$  の直下に位置している。図より、変位振幅は  $x$  軸と概ね平行に分布しており、本連行荷重下での応答が 2次元場のそれに近いものとなっていることがわかる。

また、トンネル深さ  $L=15\text{m}$  においては、鉛直変位振幅の最大値がトンネル直上より  $y$  方向に 4m 程離れた箇所に発生し、それより遠方においてはトンネル中心直上からの距離と共に概ね一様に減衰している様子が窺える。一方  $L=30\text{m}$  においては、 $y=-20 \sim -35\text{m}$  の範囲においても振幅の大きな領域が分布している。以上のことを再確認する目的で、地表面上  $y$  軸 ( $x=0$ ) に沿って鉛直変位をプロットしたものを図-4 に示す。図より、 $25\text{m} \leq |y| \leq 35\text{m}$  の範囲において  $L=30\text{m}$  の場合にピークが現れていることが確認できる。同様の傾向は二次元解析結果<sup>3)</sup> においても得られており、トンネル深さの増加が、トンネル直上から離れた領域における振動振幅を引き起こす可能性が懸念される。

### (2) 荷重走行速度の影響

荷重走行速度  $c=100\text{m/s}$  に対して得られた地表面鉛直変位振幅は、 $c=15\text{m/s}$  に対して得られた図-3 と同様に 2次元場に近い応答を示した。また鉛直変位振幅の最大値は、 $L=15\text{m}$  の場合、 $c=15\text{m/s}$  で  $2.6 \times 10^{-5}\text{m}$ 、 $c=100\text{m/s}$  で  $3.0 \times 10^{-5}\text{m}$ ； $L=30\text{m}$  の場合、 $c=15\text{m/s}$  で  $1.7 \times 10^{-5}\text{m}$ 、 $c=100\text{m/s}$  で  $2.5 \times 10^{-5}\text{m}$  であった。以上のデータのみからでは、走行速度と最大変位振幅との関係を把握するまでには至らないが、荷重がトンネル内を走行するような問題に対しても、地表面応答の最大値は速度依存性を有することがわかる。

また、 $c=100\text{m/s}$  の下  $L=15, 30\text{m}$  に対し、図-4 と同様に  $x=0$  の直線 ( $y$  軸) に沿って鉛直変位振幅をプロットしたものを図-5 に示す。 $c=15\text{m/s}$  と同様に、 $L=30\text{m}$  の場合において  $20\text{m} \leq |y| \leq 35\text{m}$  の範囲にピークの存在が認められる。なお、その値は  $1.6 \times 10^{-5}\text{m}$  程度であり、 $c=15\text{m/s}$  の場合と大差無い。以上のことより、本解析条件に関する限り、荷重走行速度が地表面の変位応答に及ぼす影響は、その最大値において認められるものの、トンネル中心直上からの距離との対応関係には有意な差異を与えないものと考えられる。

## 5. おわりに

トンネル・半無限成層地盤系の列車走行荷重に対する 3次元振動応答解析を行った。定常応答解は 2.5次元解析により求めた。地表面応答について見ると、トンネル深さの増加により最大変位振幅は減少するものの、トンネル直上から離れた領域においては、逆に変位振幅が増大し得ることが確認された。一方、速度増加は、最大変位振幅の発生位置やその値には影響を及ぼすものの、遠方場の応答にはトンネル深さ程の影響を及ぼさないことがわかった。

### 参考文献

- 1) Sheng, X. *et al.* : Ground vibration generated by a harmonic load moving in a circular tunnel in a layered ground, Proc. of 10th Int. Meeting on Low Freq. Noise and Vibr. Contr., 161-176, 2002.
- 2) Abe, K. *et al.* : Three-dimensional analysis of subway track vibrations due to running wheels, WAVE2002, 149-156, 2003.
- 3) Xia, H., Cao, Y. and Han, Y. : Traffic-induced environmental vibrations and their influences on surrounding buildings, *Envir. Vibr.*, Y. Chen and H. Takemiya (eds.), Hangzhou, China, 230-241, 2003.

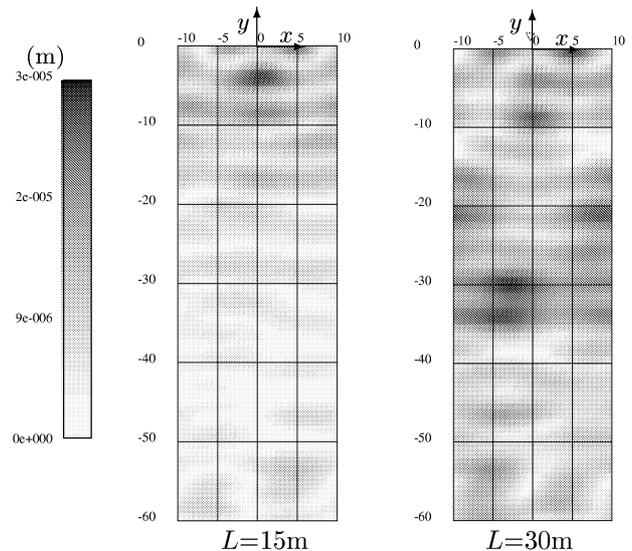


図-3 地表面鉛直変位振幅 ( $c=15\text{m/s}$ ).

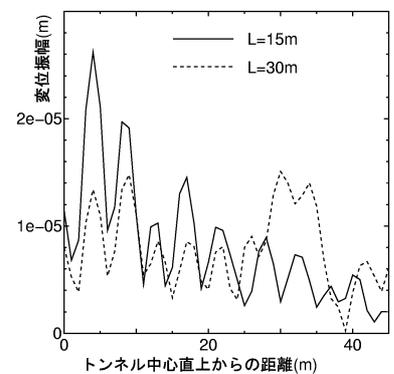


図-4 地表面鉛直変位振幅とトンネル直上からの距離との関係 ( $c=15\text{m/s}$ ).

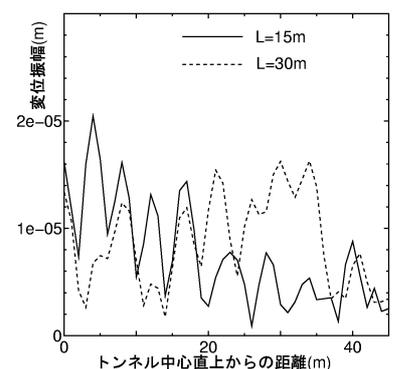


図-5 地表面鉛直変位振幅とトンネル直上からの距離との関係 ( $c=100\text{m/s}$ ).