

S8-1-2.

地下鉄列車走行下における
地表面振動応答解析

○ [土] 加藤 宏輝 (新潟大学), [土] 阿部 和久 (新潟大学), [土] 古田 勝 (東京都交通局)

Ground surface motion induced by train loads moving in a subway tunnel

Hiroaki KATO, Kazuhisa ABE and Masaru FURUTA

Three-dimensional dynamic response analysis is carried out for a tunnel-layered ground system under moving train loads. The tunnel is modeled by an elastic tube and the ground is modeled by a layered half-space. The steady-state problems are solved by means of the 2.5-dimensional analysis method. The numerical results show in some region on the ground surface, the displacement amplitude may be increased with increasing tunnel depth. Although the velocity of moving load influences on the maximal value of displacement, its effect is insignificant to the far field response.

キーワード：地下鉄，成層地盤，移動荷重，2.5 次元解析

Key words：subway track, layered ground, moving load, 2.5-D analysis

1. はじめに

地下鉄の列車走行に因る地盤振動は，近隣の居住環境等に影響を及ぼす可能性がある．そのため近年では，地下鉄の周辺地盤における振動レベルの事前予測や，様々な振動低減対策などが講じられている．さらに今後は，大深度地下開発の推進に伴い，大深度域での鉄道建設が計画される可能性も出てくる．また，主要な都市間を結ぶ高速鉄道による輸送時間のさらなる短縮には，特に構造物が輻輳する都市部において地下空間の利用が有効となり得る．以上のことから，既存形式に加え，深度や速度などの面で従来の範疇を超えた多様な条件下にある地下鉄道を対象に，その振動特性の把握を試みることに意義がある．

このような様々なケースの評価には，数値解析的手法の援用が有効となる．地上鉄道を対象とした場合において，近年 3 次元モデルによるより精密な解析が多く試みられている．一方，地下鉄道を対象とした既往の解析事例においては，2 次元モデルに基づくものが主に用いられている．2 次元モデルによる場合，移動荷重により励起される振動や，軌道方向の荷重分布などの影響を直接考慮することが不可能となる．また，問題によっては 2 次元モデルでも有意な結果が期待できる場合も存在すると思われるが，本来その妥当性の判断には 3 次元解析との比較が不可欠であろう．地下鉄道の 3 次元場での解析例としては Sheng ら¹⁾によるものが挙げられるが，トンネル内を一定速度で走行する調和点加振に対する基礎的検討の範囲に止まっている．

著者ら²⁾も，走行車輪・軌道・トンネル・地盤から成る 3 次元連成解析手法を構成し，地下鉄軌道系の振動応答の評価・予測を試みて来た．その際に，地盤は無限に広がる一様な動弾性場とした．しかし，地表面の振動応答の解析には，半無限成層地盤によるモデル化が必須となる．

本論文では，列車走行荷重に対するトンネルと半無限成層地盤との連成解析を実施する．解析に際し，コンクリー

ト道床・シールドトンネル・半無限地盤を 3 次元波動場でモデル化し，そこにまくらぎ反力を近似した分布走行荷重を外力として与える．なお，一定振動数の下一定速度で走行している荷重に対する定常応答の解析に，いわゆる 2.5 次元解析法を適用する．

以下では，まず 2.5 次元解析手法の概要について述べる．続いて，トンネル・半無限成層地盤系を対象に行った 2.5 次元解析結果より得られた地表面の変位応答に基づき，トンネル深さや荷重走行速度が振動特性に及ぼす影響について検討する．

2. 2.5 次元解析

x 方向に構造が無限に続いている動弾性場を考える．変位解 $\mathbf{u}(x, \bar{\mathbf{x}}, t)$, $\bar{\mathbf{x}} = (y, z)$ の運動方程式は次の Navier の式で与えられる．

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

ここで， $\mathbf{L}$ は空間座標に関する微分作用素， ρ は質量密度， $(\cdot) = \partial/\partial t$ である．一定形状の分布荷重モードが， ω_0 で振動しながら一定速度 c で x 方向に移動する場合，この分布荷重 $\mathbf{p}$ は次式のように与えられる．

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

ここで， $\bar{\mathbf{p}}$ は分布荷重モード， ξ 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．

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

式 (3) を (1) に代入し， ξ について Fourier 変換すると次の方程式を得る．

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

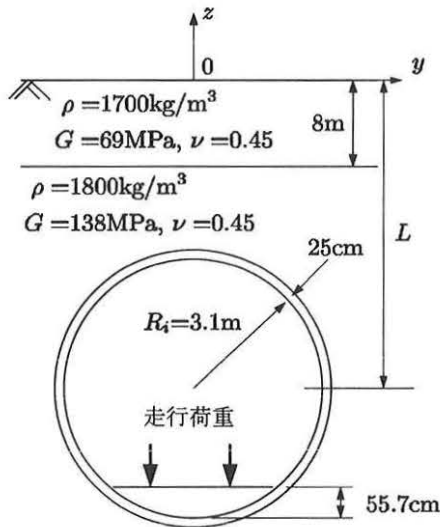


図-1 トンネル・地盤の解析条件

ここで、 $\hat{\mathbf{L}}$ は $\mathbf{L}$ の x に関する Fourier 変換、 $\hat{\mathbf{U}}$ は $\mathbf{U}$ の ξ に関する Fourier 変換である。

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、 $\mathbf{u}$ は次の逆変換で与えられる。

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

なお、本研究では、 (y, z) 平面内の準二次元場の解 $\hat{\mathbf{U}}$ を有限要素・境界要素結合法²⁾により求める。

3. 解析結果

3.1 解析条件

トンネル・地盤の解析条件を図-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、その中心深さ L は 15m 、 30m および 40m の 3 通りに設定した。また、コンクリート道床とトンネル覆工の物性値は同一とし、過去の解析結果³⁾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^3 に設定した。

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。なお、各層の質量密度 ρ 、せん断弾性係数 G 、ポアソン比 ν は図-1 のように設定した。また、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。

走行荷重は、静的輪重に対するまくらぎ反力より求めた等価な分布荷重で与えた。この分布走行荷重は、図-1 に示す通り、コンクリート道床上面に作用させた。なお、まくらぎ反力は、レール・防振パッドから成る軌道モデルの解析結果より決定した。一台車 (2 車輪) に対応する分布荷重を図-2 に示す。解析では、この分布荷重の走行速度を $c=15\text{m/s}$ 、 50m/s および 100m/s の 3 通り設定した。また、図-3 に示

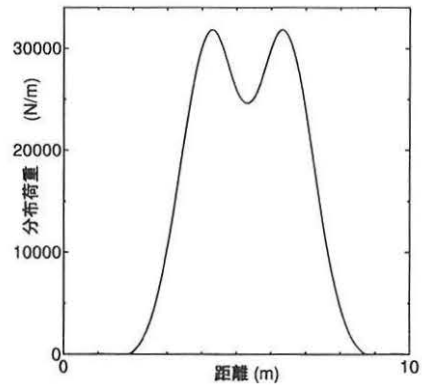


図-2 走行荷重の分布形状

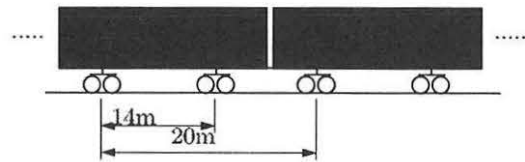


図-3 列車荷重の概要

すように、長さ 20m の車両が無限に連なって走行する場合を想定し、周期長 20m の下で一車両 (2 台車) 相当の分布荷重を与え解析を行う。なお、実際の作用荷重には、様々な振動数成分が含まれている。本研究ではトンネル・地盤系の基本的な振動特性を把握することを目的とし、一定の振動数 ω_0 で振動しつつ走行する場合について検討する。その際に、地下鉄軌道系の主要な振動数成分が $30 \sim 70\text{Hz}$ の範囲に分布することより³⁾、本解析においては $\omega_0 = 2\pi \times 40\text{rad/s}$ (40Hz) と設定した。ただし、図-3 の荷重分布は現実の走行荷重における静的成分に対応するものであり、必ずしも振動成分に直接対応しない。また特に、本解析において、 20m 周期の連行荷重は同位相の下 ω_0 で振動しつつ走行する荷重群として与えられる。したがって、振動荷重自体の設定には幾分非現実的な面も存在する。しかし、振動特性の把握に資する目的に限定すれば、これらの解析は有用な知見を提供し得るものと考えられる。

2. に述べたとおり、2.5 次元解析には有限要素・境界要素結合法を用いる。その際に、トンネルとその周辺地盤および表層を含む地盤の一部は有限要素で、それ以外の均一地盤は境界要素で離散化する。また、問題の対称性により、図-1 の $y \leq 0$ の部分を解析対象とした。なお、地表面近傍の成層地盤部は $-80\text{m} \leq y \leq 0\text{m}$ の範囲を要素分割し、その打切端には粘性境界を設定した。

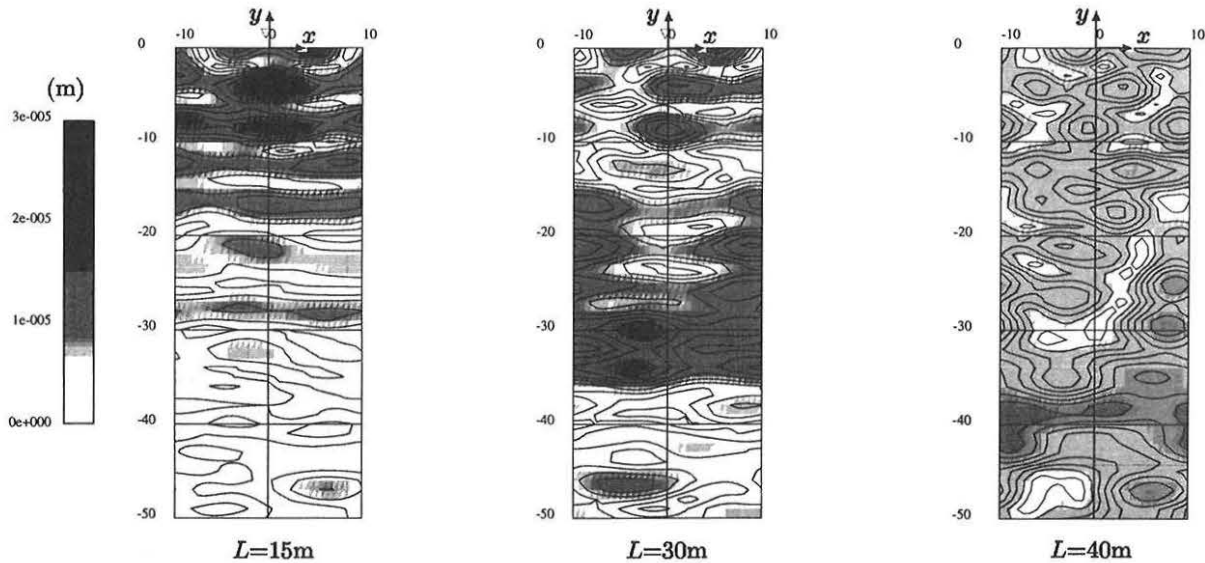


図-4 地表面鉛直変位振幅 ($c=15\text{m/s}$).

3.2 地表面の振動応答特性

(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 $L=15\text{m}$, 30m および 40m に対して得られた地表面の鉛直変位振幅を図-4 に示す。なお、これらの図はトンネル長手方向の一周区間 ($-10\text{m} \leq x \leq 10\text{m}$) について、トンネル直上 ($y=0$) から 50m 離れた地点 ($y=-50\text{m}$) 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、変位振幅の等高線は x 軸と概ね平行に伸びており、特に $L=15, 30\text{m}$ の場合においては、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付近にて発生し、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。 $L=30\text{m}$ においては、 $L=15\text{m}$ の場合と同様にトンネル直上付近にピークが認められるものの、 $y=-20 \sim -40\text{m}$ の範囲においても振幅の大きな領域が分布している。 $L=40\text{m}$ においては、 $L=15\text{m}$, 30m の場合と比べて、トンネル直上付近における振幅が非常に小さくピークは確認できない。しかし、 $y=-35 \sim -45\text{m}$ の範囲において振幅の大きな領域が分布していることが確認できる。

以上のことを再確認する目的で、地表面上 $x=0$ (y 軸) の直線に沿って鉛直変位をプロットしたものを図-5 に示す。図より、トンネル中心直上からの距離 $|y| < 25\text{m}$ の範囲においては、 $L=15\text{m}$ の場合の変位振幅が $L=30\text{m}$ のそれを上回っているが、 $25\text{m} < |y|$ の範囲ではその傾向が逆転し、 $L=30\text{m}$ の場合にピークが現れていることが確認できる。同様に 15m と 40m を比較すると、 $|y|=35\text{m}$ を境にトンネル深さと変位振幅の関係が逆転し、 $L=40\text{m}$ では $|y|=40\text{m}$ 付近においてピークが確認できる。また図より、このピー

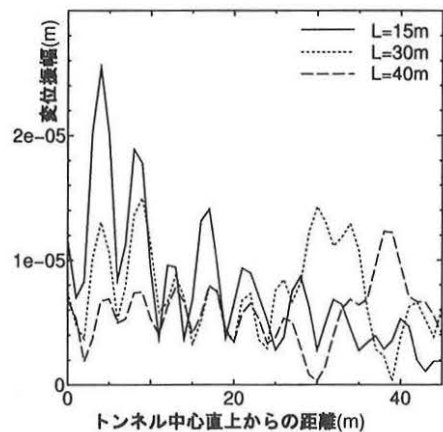


図-5 地表面鉛直変位振幅とトンネル直上からの距離との関係 ($c=15\text{m/s}$).

クとトンネル深さは概ね 1 対 1 に対応しているが、その大きさはトンネル深さによらず概ね一定の値を示していることがわかる。なお、同様の結果は 2 次元解析結果⁴⁾においても報告されており、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増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-4 と同様に 2 次元場に近い応答を示した。鉛直変位振幅の最大値は、 $L=15\text{m}$ の場合、 $c=15\text{m/s}$ で $2.6 \times 10^{-5}\text{m}$, $c=50\text{m/s}$ で $2.7 \times 10^{-5}\text{m}$, $c=100\text{m/s}$ で $3.0 \times 10^{-5}\text{m}$; $L=30\text{m}$ の場合、 $c=15\text{m/s}$ で $1.7 \times 10^{-5}\text{m}$, $c=50\text{m/s}$ で $2.1 \times 10^{-5}\text{m}$,

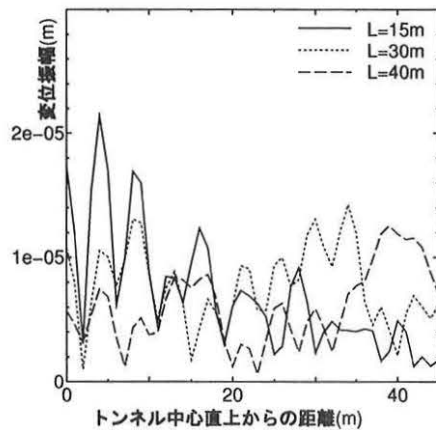


図-6 地表面鉛直変位振幅とトンネル直上からの距離との関係 ($c=50\text{m/s}$).

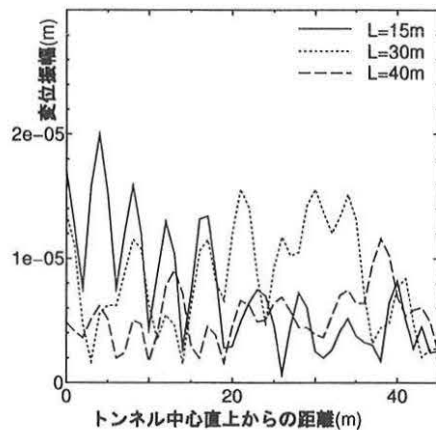


図-7 地表面鉛直変位振幅とトンネル直上からの距離との関係 ($c=100\text{m/s}$).

$c=100\text{m/s}$ で $2.5 \times 10^{-5}\text{m}$; $L=40\text{m}$ の場合, $c=15\text{m/s}$ で $1.4 \times 10^{-5}\text{m}$, $c=50\text{m/s}$ で $1.5 \times 10^{-5}\text{m}$, $c=100\text{m/s}$ で $1.7 \times 10^{-5}\text{m}$ 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、 $c=50\text{m/s}$ の下 $L=15, 30, 40\text{m}$ に対し、図-5 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-6 に、 $c=100\text{m/s}$ の下での鉛直変位振幅をプロットしたものを図-7 示す。両図において、図-5 と同様に、 $L=30\text{m}$ の場合において $20\text{m} \leq |y| \leq 40\text{m}$ の範囲に、 $L=40\text{m}$ の場合においては $35\text{m} \leq |y| \leq 45\text{m}$ 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、その最大値や発生位置において認められる。

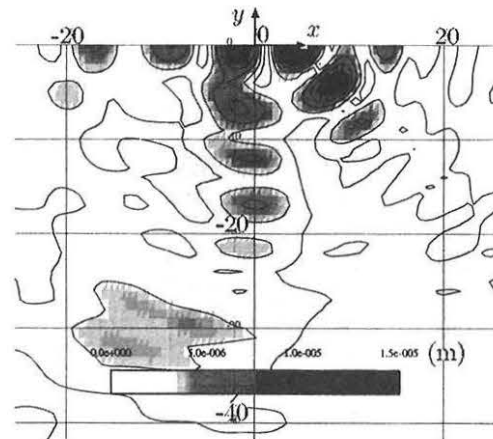


図-8 単独荷重に対する地表面鉛直変位振幅 ($L=30\text{m}$, $c=100\text{m/s}$).

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。

(3) その他の条件が結果に及ぼす影響

図-2 の一台車相当の分布荷重が、 40Hz で振動しながら単独でトンネル内を走行する場合の、地表面鉛直変位振幅を図-8 に示す。図-8 は $L=30\text{m}$, $c=100\text{m/s}$ の例である。連行荷重の場合と異なり、等高線に 2 次元場的な分布性状は認められない。ただし、周囲と比べ大きな振幅を呈する領域が y 軸上 ($x=0$) に沿って分布しており、振動の距離減衰は強い方向性を持つことがわかる。

4. 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。定常応答は 2.5 次元解析により求めた。その結果、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) 阿部和久, 佐藤大輔, 古田 勝: 地下鉄軌道における各種防振対策の解析的検討, 鉄道力学論文集, 第 7 号, 7-12, 2003.
- 4) 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.