

# 大深度地下鉄道振動の基礎杭の影響に関する3次元解析

## 3-D ANALYSIS ON THE INFLUENCE OF A PILE ON VIBRATION INDUCED BY A MOVING TRAIN IN DEEP UNDERGROUND

斎藤 隆泰<sup>1)</sup>, 廣瀬 壮一<sup>2)</sup>, 福井 卓雄<sup>3)</sup>

Takahiro SAITOH, Sohichi HIROSE and Takuo FUKUI

1) 福井大学大学院工学研究科 (〒 910-0017 福井県福井市文京 3-9-1, E-mail: tsaito@taku.anc-d.fukui-u.ac.jp)

2) 東京工業大学大学院情報理工学研究科教授 (〒 152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: shirose@cv.titech.ac.jp)

3) 福井大学大学院工学研究科教授 (〒 910-0017 福井県福井市文京 3-9-1, E-mail: tak@taku.anc-d.fukui-u.ac.jp)

In this paper, the influence of a pile on ground vibration induced by a moving train in deep underground tunnel is studied by a numerical analysis. The numerical analysis is implemented by the coupling of 2.5-D and 3-D Boundary Element Method (BEM). First, the 2.5-D BEM is used to obtain the incident wave field in a 3-D half space without pile subjected to a moving load in deep underground tunnel. Second, 3-D BEM is carried out for a soil-pile model using the obtained incident wave field. Numerical results show that it is possibility for the pile to decrease the ground vibration level around the top of the pile for a low frequency.

**Key Words:** BEM, 2.5-D analysis, Pile, Environmental vibration

### 1. はじめに

都市の稠密化の解消と国土の有効利用の観点から、近年、大深度地下利用法が制定され、深さ 40 m 以深の大深度地下空間を公共的な目的に使用することが可能となっている。一般に大深度地下を利用すると、公共事業が円滑に実施できるほか、地震に対する耐震性の向上や騒音、そして振動の低減など力学面や環境面でのメリットが期待されている。大深度になると地表面から振動源となる大深度空間までの距離は大きくなるので、一般的には騒音や振動レベルは低減すると考えられる。しかし、列車走行に伴う、いわゆる環境振動問題は、列車軌道の状態や、周辺の地盤や岩盤などにより変化するほか、建築物の基礎構造や使用用途によっても、その重要度は異なり、場合によっては重要な環境影響項目となり得る。このように必要性や緊急性が高いにもかかわらず、大深度地下に関わる環境振動に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。どの程度の深さになれば騒音・振動レベルは如何ほどになるか、基礎杭を伝播する波動の影響はないか等、多くのことが未解決のままである。もちろん、大深度地下使用法が施行されて間もないことから、大深度地下空間の建設はこれまで例がなく、現場測定によって直接振動の影響を評価することは難しい状況である。

これまで、数値シミュレーションによる浅深度における環境振動解析は、花里ら<sup>(1)</sup>や斎藤・土戸・廣瀬<sup>(2)</sup>らや、古屋・

阿部<sup>(3)</sup>らによる有限要素法や境界要素法を用いた例がある。また、地下鉄振動に関しては、津野ら<sup>(4)</sup>による模擬実験の研究も行われており、様々な興味深い結果を示している。

さて、本研究で扱うような大深度地下利用に伴う環境振動解析は、地下 40m 以深における振動源から地表面までを含めた半無限三次元動弾性問題となる。したがって、無限及び半無限領域を容易に扱える境界要素法を用いて、大深度地下利用に伴う環境振動解析を行う。振動源、トンネル、基礎杭、地表面からなる三次元動弾性問題を解くことにより、基礎杭が存在する場合の地表面における環境振動の影響評価を目的として解析を行う。

### 2. 解くべき問題

#### 2.1. 解析モデル

Fig.1 に示されるような、均質等方な半無限地盤中に存在するトンネル中を、荷重が等速度  $V$  で移動する問題を考える。トンネルは大深度地下を想定し、被り深さ 40m の位置にあり、道床には 1.6m 幅で一定の角振動数  $\Omega$  で振動しながら移動する大きさ  $P_0(N/m^2)$  の荷重が存在するとする。杭は深さ 30m、幅 1m で、トンネル中心から  $h(m)$  だけ左にずれて位置しているものとする。移動荷重  $g$  は荷重の分布を変えることなく  $x_3$  方向に運動するものとする。このような場合の地表面における環境振動の影響を数値解析により推定することが、本研究の目的である。

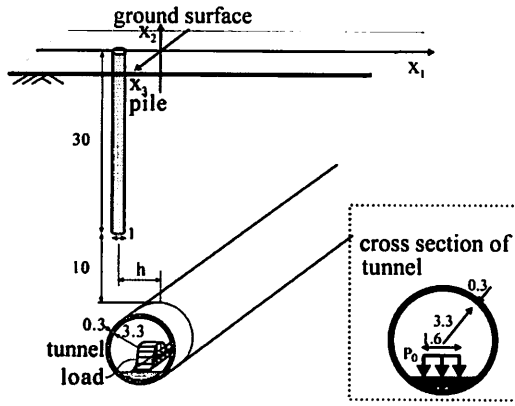


Fig. 1 3-D analysis model.

## 2.2. 解析の指針

最終的に解きたい問題は Fig.1 で表される 3 次元問題である。しかしながら、トンネル（トンネル覆工を含む）、杭、地表面全てを同時に考慮した 3 次元解析では、必要な計算時間、記憶容量は大幅に増加するため、あまり現実的でない。さて、大深度トンネルでは、杭とトンネル間との距離を 10m 以上確保することになっている。また、杭直径は高々数メートル程度である。このような場合、杭とトンネルの相互作用は小さいと考えられる。そこで、本解析においては Fig.1 のように全体系を一度に解かず、まず Fig.2 のようにトンネルからの振動発生問題を解き、その解を Fig.3 に示す杭を含む地盤への入射波として捉えることを考える<sup>(2)</sup>。トンネルからの振動発生の問題 Fig.2 は、2.5 次元問題に帰着されるため、通常の 3 次元解析に比べて大幅に計算効率を低減することが可能である。次節では、まず、そのトンネルからの振動発生問題を解くための 2.5 次元境界要素法の定式化、そして、その解を地盤への入射波として解析するための 3 次元境界要素法定式化について述べる。

## 3. 支配方程式および境界要素法

### 3.1. 支配方程式

今、境界  $S$  で囲まれた任意の 3 次元動弾性場  $D$  を考える。一般に、動弾性場において、任意の点  $\mathbf{x}$  における時刻  $t$  での、変位  $u_i(\mathbf{x}, t)$  は次の Navier-Cauchy の方程式を満たす。

$$L_{ik}(\partial_x)u_k(\mathbf{x}, t) = \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_i(\mathbf{x}, t), \mathbf{x} \in D \quad (1)$$

ただし、 $\rho$  は密度であり、 $L_{ik}(\partial_x)$  は次式で定義された微分演算子である。

$$L_{ik}(\partial_x) = C_{ijkl} \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_l} \quad (2)$$

ここで  $C_{ijkl}$  は弾性定数であり、ラメ定数  $\lambda$ 、 $\mu$  を用いて、 $C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})$  で表される。一般的に、式 (1) における境界条件は次のように表される。

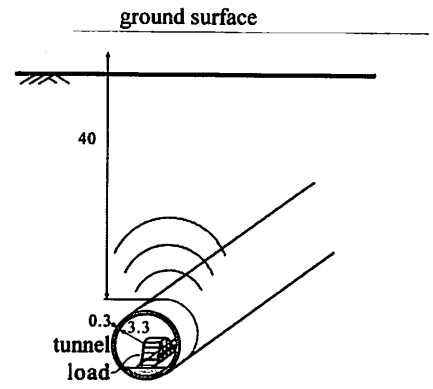


Fig. 2 2.5-D radiation problem subjected to a moving load in deep underground tunnel.

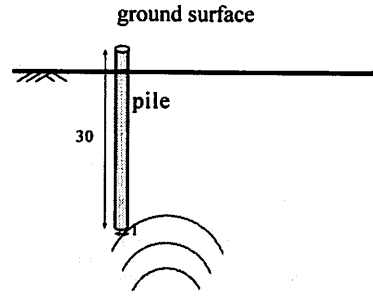


Fig. 3 3-D scattering problem for soil and pile.

$$u_i(\mathbf{x}, t) = h_i(\mathbf{x}, t), \mathbf{x} \in S_u$$

$$t_i(\mathbf{x}, t) \equiv \bar{T}_{ik}(\partial_x)u_k(\mathbf{x}, t) = g_i(\mathbf{x}, t), \mathbf{x} \in S_t = S \setminus S_u \quad (3)$$

ただし、 $h_i$ 、 $g_i$  は与えられた境界値である。また  $\bar{T}_{ik}(\partial_x)$  は表面力作用素であり、 $\bar{T}_{ik}(\partial_x) = C_{ijkl}n_j(\mathbf{x})\partial/\partial x_l$  で表される。ここに、 $n(\mathbf{x})$  は  $\mathbf{x}$  における外向き法線を表す。

### 3.2. 2.5 次元解析

さて、もし 3 次元動弾性場  $D$  が  $x_3$  方向に一様な断面を持つものとするれば、そのような問題は 2.5 次元問題へ帰着することができる。今、 $\mathbf{x}_3$ 、 $t$  に関するフーリエ変換を次のように定義する。

$$\bar{f}(x_1, x_2, \xi_3, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, x_2, x_3, t) e^{-i\xi_3 x_3} dx_3 \quad (4)$$

$$\hat{f}(x_1, x_2, x_3, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1, x_2, x_3, t) e^{i\omega t} dt \quad (5)$$

ここで、式 (4)、(5) を式 (1)、(3) に適用すれば、次のような二次元空間  $\mathbf{X} = (x_1, x_2)$  における支配方程式

$$L_{ik}(\partial_{x_1}, \partial_{x_2}, i\xi_3) \hat{u}_k(\mathbf{X}, \xi_3, \omega) = -\rho\omega^2 \hat{u}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega), \mathbf{X} \in \bar{D} \quad (6)$$

と、対応する境界条件

$$\begin{aligned} \hat{u}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega) &= \hat{h}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega), \mathbf{X} \in \bar{S}_u \\ \hat{t}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega) &= \hat{g}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega), \mathbf{X} \in \bar{S}_t = \bar{S} \setminus \bar{S}_u \end{aligned} \quad (7)$$

を得ることが出来る。ここで、 $\bar{D}$  は  $x_1$ - $x_2$  面内における境界  $\bar{S}_u, \bar{S}_t$  で囲まれた二次元領域を表す。もし、式(6), (7)で定義された二次元境界値問題の解  $\hat{u}_i$  が求めれば、三次元空間の位置  $\mathbf{x}$ , 時刻  $t$  における解  $u_i(\mathbf{x}, t)$  は、形式的に、次の逆フーリエ変換により求まる。

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{u}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega) e^{i(\xi_3 x_3 - \omega t)} d\omega d\xi_3 \quad (8)$$

しかしながら、式(8)における計算では、全ての  $\omega, \xi_3$  に関する二次元の解  $\hat{u}_i$  を必要とすることから計算効率上好ましくない。さて、今、移動荷重は  $x_3$  軸に沿って一定の速度・荷重分布を持ち、角振動数  $\Omega$  で振動しながら移動すること、解析モデルが  $x_3$  軸に垂直な断面にて一様であることを考えれば、時刻  $t$  における変位  $u_i(\mathbf{x}, t)$ 、及び  $g_i(\mathbf{x}, t)$  は、次のように表せる。

$$u_i(\mathbf{x}, t) = u_i(\mathbf{X}, x_3 - Vt, t) e^{-i\Omega t} \quad (9)$$

$$g_i(\mathbf{x}, t) = g_i(\mathbf{X}, x_3 - Vt, t) e^{-i\Omega t} \quad (10)$$

ここで、式(9)を、式(4),(5)を用いてフーリエ変換すれば、

$$\hat{u}_i(\mathbf{X}, \xi_3, \omega) = 2\pi \hat{u}'(\mathbf{X}, \xi_3, \omega) \delta(\omega - \Omega - \xi_3 V) \quad (11)$$

を得ることが出来る。ただし、 $\delta(\cdot)$  はディラックのデルタ関数であり、 $\hat{u}'(\mathbf{X}, \xi_3, \omega)$  は  $\omega = \xi_3 V + \Omega$  の条件下における式(6)の解である。式(11)を式(8)に代入すれば、変位  $u_i(\mathbf{x}, t)$  は、

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{u}'_i(\mathbf{X}, \xi_3, V\xi_3 + \Omega) e^{i(x_3 - Vt)\xi_3 - i\Omega t} d\xi_3 \quad (12)$$

と求まる。従って、移動荷重により支配される三次元空間における変位場  $u_i(\mathbf{x}, t)$  は、 $\omega = \xi_3 V + \Omega$  なる条件下で二次元境界値問題を解くことに帰着され、式(12)のように  $\xi_3$  に関する  $\hat{u}'_i(\mathbf{X}, \xi_3, V\xi_3 + \Omega)$  の一度の逆フーリエ変換を実行すること

により得られることがわかる。数値計算上では、その逆フーリエ変換は高速フーリエ変換 (FFT) により実行される。

### 3.3. 2.5次元動弾性境界要素法

前節で述べたように、本研究では、まず式(6),(7)で定義された二次元境界値問題を境界要素法を用いて解く。境界要素法における、いわゆる基本解  $U_{jk}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  は、次の運動方程式を満たす。

$$\begin{aligned} L_{ij}(\partial_{x_1}, \partial_{x_2}, -i\xi_3) U_{jk}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) + \delta_{ik} \delta(\mathbf{X} - \mathbf{Y}) \\ = -\rho\omega^2 U_{ik}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \end{aligned} \quad (13)$$

この時、基本解  $U_{jk}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})$  は Li ら<sup>(5)</sup> により次の形式で与えられる。

$$\begin{aligned} U_{ik}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) = \frac{i}{4\mu} \left[ H_0^{(1)}(\bar{k}_T R) \delta_{ik} \right. \\ \left. + M_{ik}(\partial_x) \left\{ H_0^{(1)}(\bar{k}_T R) - H_0^{(1)}(\bar{k}_L R) \right\} \right] \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $H_0^{(1)}$  は0次の第一種ハンケル関数を表し、 $M_{ik}(\partial_x)$  は微分演算子、

$$\begin{aligned} M_{ik}(\partial_x) = \frac{1}{k_T^2} \left\{ \delta_{\alpha k} \delta_{\beta i} \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \right. \\ \left. - i\xi_3 (\delta_{3k} \delta_{\alpha i} + \delta_{3i} \delta_{\alpha k}) \frac{\partial}{\partial x_\alpha} - \xi_3^2 \delta_{3k} \delta_{3i} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

で表される。ただし、 $R = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2}$ ,  $\bar{k}_T = \sqrt{k_T^2 - \xi_3^2}$ ,  $\bar{k}_L = \sqrt{k_L^2 - \xi_3^2}$  である。また、 $k_L, k_T$  はそれぞれ P 波、S 波の波速  $c_L, c_T$  を用いて  $k_L = \omega/c_L$ ,  $k_T = \omega/c_T$  で定義される波数である。

本研究においては、最終的に Fig.2 で表されたトンネルからの振動発生問題に対して、地表面を含めた地盤、トンネルそれぞれの領域に対して境界積分方程式を構成し、離散化を行い、代数方程式に帰着することにより解を求める。こうして、式(12)から、3次元問題の解は、 $\omega = \xi_3 V + \Omega$  の条件下で解かれた2次元問題の解  $\hat{u}_i(\mathbf{Y}, \xi_3, \omega)$  を用いて得ることが出来る。

### 3.4. 3次元動弾性境界要素法

これまで説明してきた2.5次元解析は、解析モデルが  $x_3$  方向に一様な断面を持つ場合に有効である。したがって、Fig.1のような杭を擁する問題に対しては、3次元解析を実行しなければならない。以下では、2.5次元解析で求めた求めた解を、杭を含む地盤への入射波として捉えた3次元解析について考え、領域 I (地盤部分)、領域 II (杭部分) における変位等を右上添え字の番号  $I, II$  に対応付けて表記することとする。

3次元境界要素法で解くべきモデルは、Fig.3 で表されるような、トンネルを分離した解析モデルである。2.5次元解析で得られる解を杭を含む地盤への入射波と考えれば、ここで

解くべき問題は杭による散乱問題となる。さて、トンネル内の移動荷重  $g$  による入射波  $\mathbf{u}^{I,in}$  は、杭および地表面により反射、散乱される。すなわち、領域  $I$  に対して、全変位場  $\mathbf{u}^{I,3D}$  は散乱波成分  $\mathbf{u}^{I,sc}$  を用いて

$$\mathbf{u}^{I,3D} = \mathbf{u}^{I,in} + \mathbf{u}^{I,sc} \quad (16)$$

で表される。今、領域  $I$  において、地表面を  $S_1$ 、地盤と杭の表面境界を  $S_2$  とすれば、境界積分方程式は、 $\mathbf{u}^{I,sc}$  に対応する表面力  $\mathbf{t}^{I,sc}$  を用いて、

$$\int_{S_A} \left\{ U_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) t_k^{I,sc}(\mathbf{y}, \omega) - T_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) u_k^{I,sc}(\mathbf{y}, \omega) \right\} dS_y = \frac{1}{2} u_i^{I,sc}(\mathbf{x}, \omega), \mathbf{x} \in S_A = S_1 + S_2 \quad (17)$$

で表される。ここに、 $U_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  は、三次元動弾性問題の基本解<sup>(6)</sup>であり、次式で表される。

$$U_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{4\pi\mu} \left[ \frac{e^{ik_r r}}{r} \delta_{ik} + \frac{1}{k_T^2} \frac{\partial^2}{\partial y_i \partial y_k} \left\{ \frac{e^{ik_r r}}{r} - \frac{e^{ik_L r}}{r} \right\} \right] \quad (18)$$

ただし、 $r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$  である。また二重層核  $T_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  は、

$$T_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = n_j(\mathbf{y}) C_{kjppq} \frac{\partial}{\partial y_q} U_{ip}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (19)$$

で定義される。式(17)に式(16)を代入し、地表面において  $\mathbf{t}^{I,3D} = \mathbf{t}^{I,in} = 0$  を考慮すれば、結局、領域  $I$  における境界積分方程式は、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} u_i^{I,3D}(\mathbf{x}, \omega) + \int_{S_A} T_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \omega) u_k^{I,3D}(\mathbf{y}, \omega) dS_y \\ & - \int_{S_2} U_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \omega) t_k^{I,3D}(\mathbf{y}, \omega) dS_y \\ & = \frac{1}{2} u_i^{I,in}(\mathbf{x}, \omega) + \int_{S_A} T_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \omega) u_k^{I,in}(\mathbf{y}, \omega) dS_y \\ & - \int_{S_2} U_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \omega) t_k^{I,in}(\mathbf{y}, \omega) dS_y \end{aligned} \quad (20)$$

で表される。一方、杭の領域  $II$  において、杭頭表面を  $S_3$  とすれば、杭内部に関する境界積分方程式は

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} u_i^{II,3D}(\mathbf{x}, \omega) = \int_{S_2} U_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \omega) t_k^{II,3D}(\mathbf{y}, \omega) dS_y \\ & - \int_{S_B} T_{ik}^{3D}(\mathbf{x}, \omega) u_k^{II,3D}(\mathbf{y}, \omega) dS_y, \mathbf{x} \in S_B = S_2 + S_3 \end{aligned} \quad (21)$$

で表される。式(20)、(21)において、 $S_2$  上の境界条件

$$u_i^{I,3D} = u_i^{II,3D}, \quad t_i^{I,3D} = -t_i^{II,3D} \quad \text{on } S_2 \quad (22)$$

Table 1 Material constants used in this analysis.

|                 | $c_L$ (m/s)                             | $c_T$ (m/s) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------|---|-------------|-----------------------------|
| Half-space soil | 1600                                    | 400         | 2000                        |
| Tunnel lining   | 1387                                    | 789         | 2300                        |
|                 | ( $\mu=1435\text{MPa}$ , $\nu = 0.26$ ) |             |                             |
| Pile            | 4000                                    | 2500        | 2400                        |

を考慮して解くことで、境界上の変位および表面力を決定することが出来る。これまで述べたように、式(20)における入射波成分  $\mathbf{u}^{I,in}$  は、トンネル内を一定の速度  $V$  で移動する移動荷重による2.5次元問題の周波数域の解である。周波数域における2.5次元問題の解は、式(12)において、積分変数  $\xi_3$  と  $\omega$  に関して変数変換すると、次の式を得る。

$$u_i(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{V} \hat{u}_i(\mathbf{X}, \frac{\omega - \Omega}{V}, \omega) e^{i \frac{\omega - \Omega}{V} x_3} e^{-i\omega t} d\omega \quad (23)$$

式(23)は逆 Fourier 変換の形をしているから、周波数域における入射波  $u_i^{in}(\mathbf{x}, \omega)$  は、形式的に、

$$u_i^{in}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{1}{V} \hat{u}_i(\mathbf{X}, \frac{\omega - \Omega}{V}, \omega) e^{i \frac{\omega - \Omega}{V} x_3} \quad (24)$$

と得ることが出来る。以上で、トンネルを分離した地盤-杭系の3次元問題を解く準備は整った。

#### 4. 3次元環境振動解析結果

以下、数値解析例を示す。なお、すべての解析結果は、列車速度を  $V = 75\text{km/h}$  とし、地盤、トンネル覆工、杭の材料定数は表1の値を用いた。また、解析結果における各振動数は、それぞれ移動荷重の振動数と等しい振動数に対して解析を行ったものである。

##### 4.1. トンネルと杭を分離した2次元解析

トンネルと杭を分離した3次元解析を行う前に、2次元解析により、杭、トンネルの両者を分離した解析を行い、問題がないかについて比較検討することを行う。そのため、まず、2次元解析における杭-トンネル全体系の一体解析法と、杭とトンネルを分離した解析法の両方で、2次元境界要素法により解を求め、それらの結果を比較検討する。Fig.4-(a),(b)は  $x_1 = -20\text{m}$  に杭がある場合の地表面での水平(a)、および鉛直方向変位応答を両解析法で求めて比較したものである。実線や点線等は杭-トンネル全体系を解いた結果を表し、白丸は杭とトンネルを分離して解析した結果を表している。高振動数において若干の差がみられるが、両者の結果はよく一致している。よって、杭がトンネルからある程度離れている場合には両者を分離して解析しても問題はないことが示された。

##### 4.2. トンネルと杭を分離した3次元解析

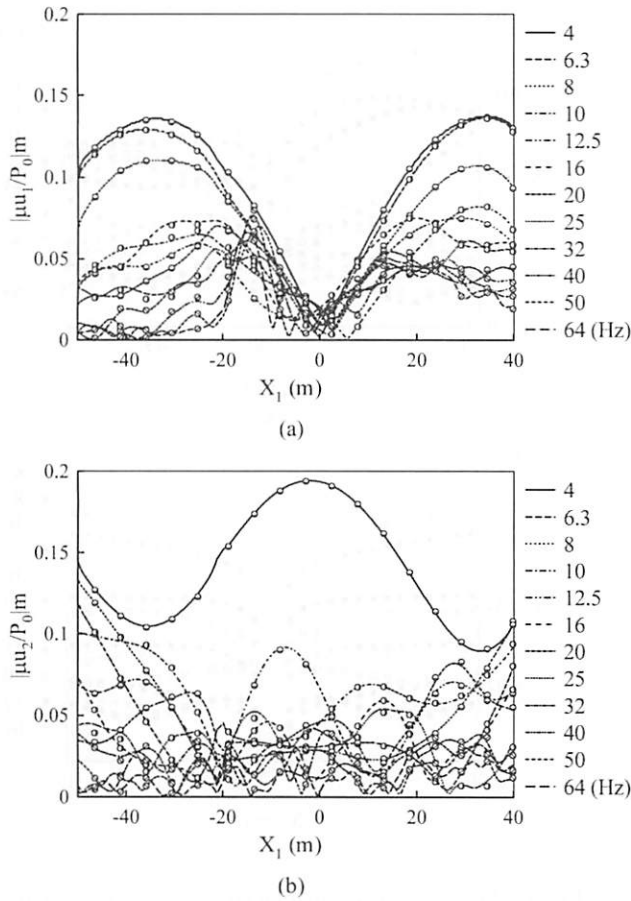


Fig.4 (a) Horizontal and (b) vertical surface displacements at the several frequencies in 2-D analysis.

次に、3次元解析の結果を示す。また、Fig.5に本解析で用いた杭-地表面の境界要素分割モデルを示した。要素数は領域Iにおいて1368、領域IIにおいて376である。境界要素は振動数64Hzに相当するS波の波長( $\lambda \approx 6.25\text{m}$ )に対応して要素分割している。また、杭頭周辺の影響を考察するため、地表面は実際には半無限長であるが有限長に近似して解析を行っている。さて、実際の地下鉄道では、あらゆる振動周波数ごとに一定の分布荷重が作用するわけではない。また、実測値の評価においては、しばしば線路脇で計測された振動の振幅値に対する地表面での振幅値の比で表された振動伝達関数を用いられることが多い。そこで、本解析においても、振動数毎に参照点での振動値を基準とした地表面での振動振幅値の相対比によってデータを整理する。以下では参照点としてトンネル道床の点 $(x_1, x_2, x_3) = (-0.135\text{m}, -46.3\text{m}, 0\text{m})$ を選定し、その参照点での鉛直方向変位振幅値を $u^{\text{ref}}$ とする。

#### 4.2.1 $h = 0$ の場合

振動数毎の地表面での鉛直方向変位の値を検討するために、 $x_1$ 軸、 $x_3$ 軸上における鉛直方向変位を $u^{\text{ref}}$ で正規化した値を、それぞれFig.6-(a),(b)に示す。6.3、8、10Hzの低振動数域では、杭頭での鉛直変位がその周辺に比べて増幅され、それ以外の場合は、周辺の変位を抑制していることがわかる。またFig.7-(a),(b)は8Hz、40Hzでの地表面での鉛直方向変位

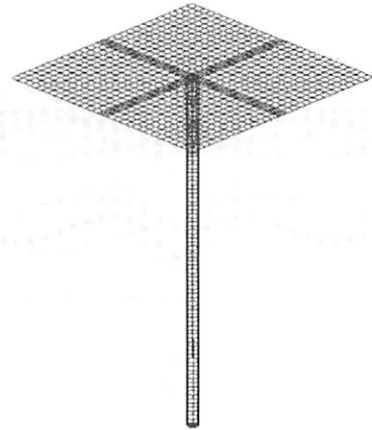


Fig.5 Boundary element mesh for the 3-D analysis model.

をカラーマップで示した図である。ただし各図のカラーマップのスケールが異なるので、色だけで相互比較することはできないことに注意されたい(後のFig.9に関して同様)。8Hzの低振動数では杭頭における変位はその周辺よりも大きい値を示しているが、40Hzの場合には逆に杭頭の変位がその周辺よりも小さい値を示していることがみてとれる。

#### 4.2.2 $h = 20$ の場合

また、Fig.8,9は、杭がトンネル中心から $h = 20\text{m}$ だけ離れた位置にある場合の結果を、 $h = 0\text{m}$ の場合のFig.6,7に対応して示したものである。Fig.8-(a),(b)より、 $h = 20\text{m}$ の場合には、6.3Hzおよび16Hzの振動数において杭頭の鉛直変位が周辺の変位よりも若干大きくなっているものの、 $h = 0\text{m}$ の場合ほどは低振動数における杭による変位の増幅効果はあまり強くない。その他の振動数においては、杭頭での変位がその周辺の変位よりも小さくなっていて、周辺の変形を抑制するような挙動が見られる。また、Fig.9-(b)において、杭頭の変位はFig.7-(b)同様、その周辺よりも大きい値を示していることがわかる。

### 5. おわりに

2.5次元境界要素法および3次元境界要素法を用いて、大深度地下利用時に杭を介して地表面に伝播する列車振動の影響を評価する基礎的研究を行った。比較的振動数において杭がトンネルに近いほど周辺の変位を増幅することがわかった。本研究においては杭と地盤間の境界条件を完全に密着していると仮定して解析を行っているが、実際には杭と地盤の密着は完全ではなく、また、減衰の影響などが考えられることから、本解析結果ほどの増幅はないと考えられる。また、本解析では一本の杭を対象として解析を行っているが、複数の杭に支えられる実際の構造物では異なる応答が得られることも考えられるため、今後十分に検討する必要がある。また、そのような解析ではより大規模な問題を扱う必要が生じるため、

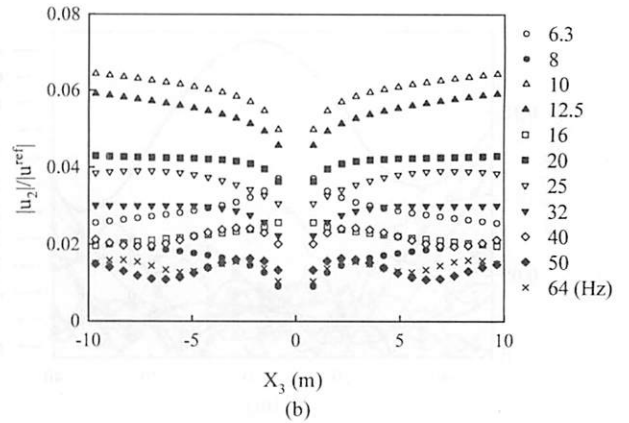
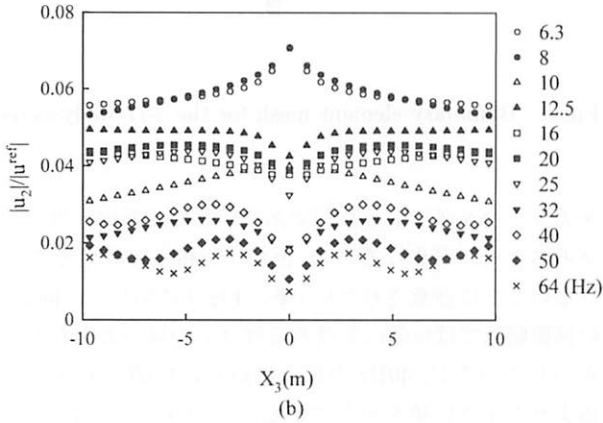
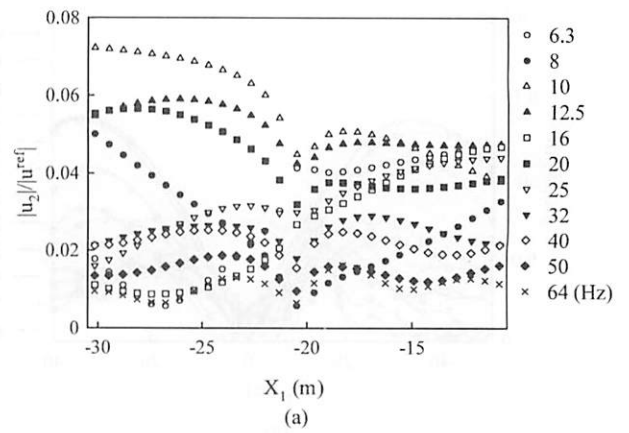
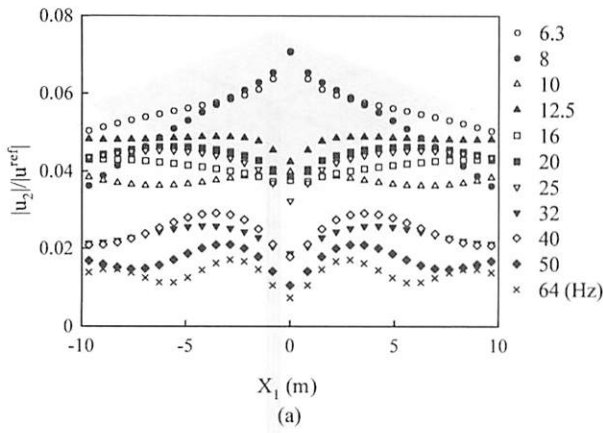


Fig. 6 Vertical surface displacements with  $h = 0$  along the (a)  $x_1$  axis and (b)  $x_3$  axis (scaled with the  $u^{\text{ref}}$ ).

Fig. 8 Vertical surface displacements with  $h = 20$  along the (a)  $x_1$  axis and (b)  $x_3$  axis (scaled with the  $u^{\text{ref}}$ ).

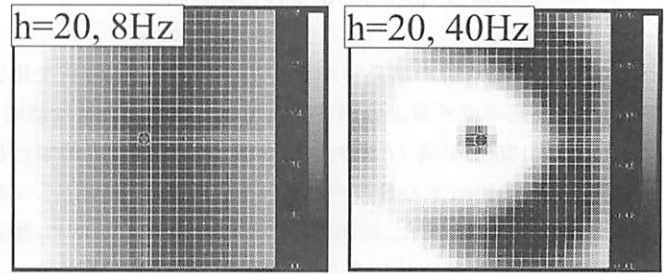
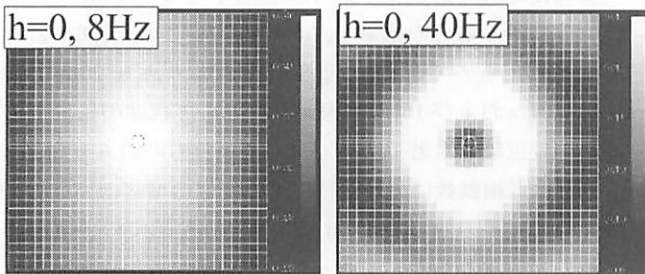


Fig. 7 Vertical displacement amplitudes on the ground surface with  $h = 0$  at the frequencies of (a) 8Hz and (b) 40Hz. ( $-10 \leq x_1 \leq 10, -10 \leq x_3 \leq 10$ )

Fig. 9 Vertical displacement amplitudes on the ground surface with  $h = 20$  at the frequencies of (a) 8Hz and (b) 40Hz. ( $-30.5 \leq x_1 \leq -10.5, -10 \leq x_3 \leq 10$ )

高速多重境界要素法<sup>(7)</sup>を導入し、計算の効率化を図ることも課題である。

#### 参考文献

- (1) Hanazato, T. et al. : Three-dimensional analysis of traffic-induced ground vibrations, *J. Geotech. Eng. ASCE* **117**, pp. 1133-1151, 1991.
- (2) 斎藤隆泰・土戸研一・廣瀬壮一 : 列車走行に伴う環境振動解析のための 2.5-D・3-D 高速多重境界要素・結合解法の開発, 応用力学論文集 vol.7, pp.255-262, 2004.
- (3) 古屋卓稔・阿部和久 : 超高速地下鉄道における地盤振動応答解析, 計算数理工学論文集, vol.6, pp.49-54, 2006.

- (4) 津野 究・森本 亘・伊藤 和也・村田 修・日下部 治: 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.
- (5) Li, Z. L. : Refraction and transmission of obliquely incident surface waves by an edge of a quarter space : Theory and experiment, *J. Appl. Mech.* **59**, pp. 349-355, 1992.
- (6) 小林昭一編著 : 波動解析と境界要素法, 京都大学学術出版会, 2000.
- (7) Nishimura, N. : Fast multipole accelerated boundary integral equation methods, *Applied Mechanics Rev.*, **55**, pp. 299-324, 2002.