

S8-3-3

高速多重極境界要素法を用いた基礎杭周辺の 環境振動シミュレーション

[土] ○廣瀬 壮一 (東京工業大学大学院情報理工学研究科)
齋藤 隆泰 (東京工業大学大学院情報理工学研究科)

A Simulation of Environmental Vibration Around a Pile Using Fast Multipole Boundary Element Method
Sohichi HIROSE and Takahiro SAITOH

Recently, many buildings have been constructed close to subway tunnels in urban areas. It is therefore important to study the vibration from a moving train in subway tunnels. In this paper, a simulation is conducted to investigate the property of subway-induced vibration by a train using a coupling method of the 2.5-D boundary element method and fast multipole boundary element method. After descriptions of the coupling method, the elastic wave scattering around a pile in frequency domain is shown as a numerical example.

キーワード: 2.5 次元、高速多重極境界要素法、基礎杭、移動荷重

Keyword: 2.5-D problem, fast multipole boundary element method, pile, moving load

1. はじめに

都市の稠密化と国土の有効利用の観点から大深度地下利用法が制定され注目を集めている。一般的に、地下 40 メートル以深に相当する大深度地下の利用は、力学面や、環境面におけるメリットを期待できるといわれている。しかし、列車走行に伴う、いわゆる環境振動は周辺の地盤や岩盤の状況に大きく依存し、場合によっては重要な環境影響評価項目と成り得る。列車速度や深度と振動レベルの関係や基礎杭を伝わる弾性波動の影響等、多くのことが未解決のままである。そのため、何らかの手法を用いて、地表面、トンネル、周辺構造物までを考慮し、発生する振動レベルを評価する必要がある。一般的に、地下鉄道は公共性が高く施設設置後の補修改善が容易でないことから、数値シミュレーションにより、発生する環境振動レベルを効率的に予測し評価する手法が有用であると考えられる。しかしながら、地下鉄振動による三次元数値シミュレーションはこれまでほとんど行われていない。また、数少ない三次元解析もいわゆる 2.5 次元問題の概念を取り入れ、列車進行方向に断面形状が一定である問題が行われている¹⁾程度であり、トンネルや基礎杭の三次元的な考慮はこれまでほとんどされていないのが現状である。このような中、著者らのグループでは、列車走行に伴う環境振動問題に関する 2.5-D・3-D 結合解法を提案し種々の三次元形状を擁する問題を解決してきた²⁾。本研究では、列車走行に伴う基礎杭周辺の環境振動シミュレーションを行い、基礎杭が地下鉄振動へ与える影響について考察する。

2. 解くべき問題

Fig.1 に示すように、均質等方な地盤 D_S が擁するトンネル内部を移動荷重 g が等速度 V で運動する問題を考える。なお、座標は右手系とし、トンネル長手方向を x_3 軸に取る。 D_S 内部には、 x_3 方向に無限に長い内径 $2.5a$ のトンネル、及び長さ $20a$ 、直径 a の円筒形の基礎杭 D_P が存在するとする。ただし、地表面と基礎杭の連結部分にお

ける地中梁の影響は考慮しないものとする。また移動荷重 g は荷重の分布を変えずに $+x_3$ 方向に一定の振動数 ω_0 で振動しながらトンネル内を進行するとする。この時、周波数域における三次元弾性波動場 $u_i(\mathbf{x}, \omega)$ は次の支配方程式を満たす。

$$C_{ijkl}u_{k,lj}(\mathbf{x}, \omega) + \rho\omega^2 u_i(\mathbf{x}, \omega) = 0 \quad \in D_S, D_P \quad (1)$$

ここで、 C_{ijkl} は弾性定数であり、 ρ は密度である。解くべき問題は、支配方程式 (1) を満たす変位 $u_i(\mathbf{x}, \omega)$ を境界条件の下で、解く問題に帰着される。本研究では、式 (1) を解くために、波動解析に優れた威力を発揮する境界要素法³⁾を用いる。

3. 2.5-D・3-D 高速多重極境界要素結合解法

式 (1) を満たす解 $u_i(\mathbf{x}, \omega)$ を求めるために、境界要素法を用いるのが有用ではあるが、ここで大きな問題が生じる。通常、境界要素法では、離散化された境界積分方程式を代数方程式に帰着し解かなければならない。しかし、得られる代数方程式は密行列を伴うため、要素数の増加に伴い、記

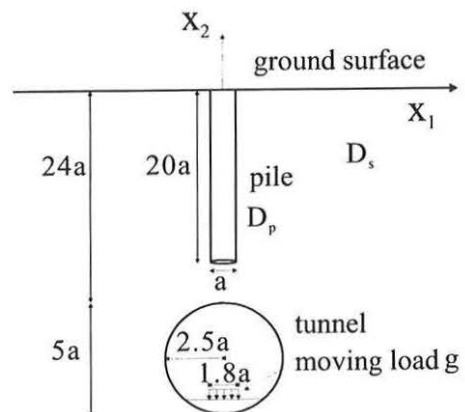


図 1 解析モデル

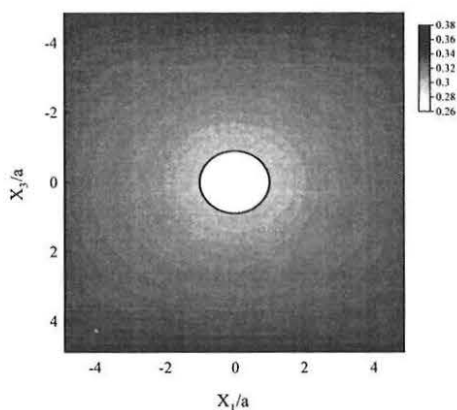


図 2 地表面における鉛直方向変位場

憶容量・計算時間も大幅に増加する。そのため、三次元問題では、現実的な計算の範囲内で問題を解くことは難しい。本研究では、このような問題点を解決するために、次の二つのステップに分けて解析を行う。まず、図 1 で基礎杭が存在しない場合を考える。すると、地表面、及びトンネルによる、いわゆる 2.5 次元問題に帰着される。従って、2.5 次元境界要素法を用いてトンネルの無限長さ方向から到来する移動荷重の影響を効率的に求めることが可能となる。ここで求めた 2.5-D 境界要素法の解 $\hat{u}_i(\mathbf{X}, \frac{\omega - \omega_0}{V}, \omega)$ (ただし、 $\mathbf{X} = (x_1, x_2)$) に逆フーリエ変換の関係を利用することで、三次元周波数域における、移動荷重による入射場

$$u_{in}(\mathbf{x}, \omega) = \frac{1}{V} \hat{u}_i(\mathbf{X}, \frac{\omega - \omega_0}{V}, \omega) e^{\frac{i(\omega - \omega_0)x_3}{V}} \quad (2)$$

を求めることが出来る²⁾。次に、2.5 次元問題で求めた $u_{in}(\mathbf{x}, \omega)$ を入射波とみなして、基礎杭、地表面、トンネルによる三次元散乱問題を境界要素法で解く。その際、近年、急速に発達しつつある大規模問題に対する数値解析手法である、高速多重極法を境界要素法に適用した高速多重極境界要素法⁴⁾を用いて解析する。高速多重極境界要素法を用いることで、計算時間に対しては、行列ベクトル積を高速化するために多重極法を用いること、記憶容量に対しては反復法を用いることで、効率的に計算をすることが可能となる。

4. 数値解析例

以下、解析結果を示す。移動荷重は等速度 $V/c_T = 0.2083$ で運動するとする。また x_3 方向には $g = g_0 \sin^2(x_3 - Vt + \pi/2)$ の荷重分布を持つとし、 x_1 方向には $-0.9 < x_1/a < 0.9$ の範囲に一樣に作用する。時刻 $c_T t/a = 0$ において荷重のピーク値 g_0 が x_1 軸上に到達するものとする。ここで、地盤 D_S 及び基礎杭 D_P における P 波と S 波のそれぞれの速度比は $c_L/c_T = 1.98$ 、 $c'_L/c'_T = 1.73$ とした。また、 $c'_T/c_T = 14$ とした。以下では、簡単のため、トンネルからの散乱波を無視し、 $\omega_0 = 0$ として解析を行った。また反復法には GMRES を使い、ブロック対角行列を前処理行列として利用した。図 2 は $ak_T = 0.005$ における地表面での鉛直方向変位場を表している。なお、図 2 中の白抜き部分は基礎杭表面の部分を表している。基礎杭から離れるにつれて大きな変位応答を確

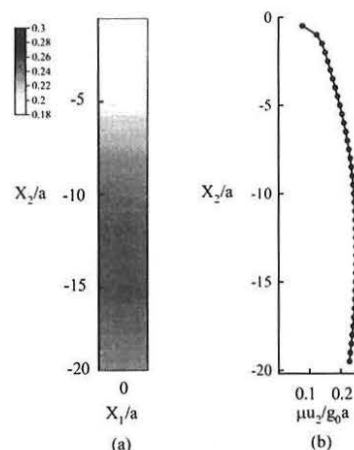


図 3 基礎杭における鉛直方向変位
(a):断面 $z = 0$ における変位場 (b): x_2 軸上鉛直方向変位

認することが出来る。また、図 3 はその時の基礎杭における断面 $x_3 = 0$ における鉛直方向変位場 (図 3-(a)) と x_2 軸上における鉛直方向変位 (図 3-(b)) を横軸に取って表した図である。鉛直方向変位は、 $x_2/a = -20$ から $x_1/a = -13$ 付近まではやや増加するものの、以後地表面に近づくにつれてその大きさは減少する傾向にあり、特に、地表面に近づくにつれ、減少する度合いは強い。 $x_2 = 0$ 付近の鉛直方向変位は、 $x_2 = -20a$ 付近の鉛直方向変位の約 3 割程度に減少している。本研究では、移動荷重の振動数を $\omega_0 = 0$ として解析を行ったため、結果は静的応答に近い形で現れている。しかしながら、基礎杭を伝播する弾性波動はガイド波としての性質を示すものと考えられる。従って、移動荷重の振動を考慮に入れた場合、基礎杭を伝播する波動の影響が顕著に現れると考えられ、地表面における振動振幅の増加を引き起こす可能性があると思われる。

5. おわりに

2.5-D・3-D 高速多重極境界要素結合解法を用いてトンネル、地表面及び基礎杭からなる三次元弾性波動解析を行った。本研究では、トンネルからの散乱波を考慮にいれなかったものの、同様の手法でトンネルまでを考慮した解析を実行することが可能である。現在、荷重の振動を考慮に入れた三次元時間域における基礎杭周辺の波動場を計算中である。今後は、本手法を用いて移動荷重の速度、振動数と基礎杭を伝わる波動及び地表面における応答を定量的に検討していく予定である。

参考文献

- 1) 阿部和久・加藤宏輝・古田勝：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，土木学会第 59 回年次学術講演会，pp.57-58.(2004)。
- 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 高速多重極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) 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)。
- 4) 福井卓雄・服部純一：多重極展開法による境界要素解析の効率化，計算工学講演会論文集，vol.1, pp. 319-322.(1996)。