

走行振動荷重による盛土・掘削道路の地盤振動シミュレーション

Simulation of Ground Vibration Generated by Moving Excitation in Banked Road and Cut Road

北村 泰寿

Yasutoshi Kitamura

1. はじめに

道路交通による沿道の地盤振動のシミュレーションでは、便宜的に加振力の移動を無視して空間的に固定した加振源として取り扱われてきた。一方、振動荷重が走行する場合を3次元波動場で取り扱う研究も行われているが、解析モデルが限定されるか、コンピュータの容量や演算コストの面から数値計算上の制約を受けることになる。前者の例としては理論解¹⁾が挙げられるが、波動場は半無限地表面を有する均質地盤モデルに限られる。福和ら²⁾、源栄ら³⁾は、時間および水平空間に対してフーリエ変換、深さ方向に対して薄層要素法(TLM)を適用した数値解析法を展開している。この解析法では成層地盤を容易に扱えるが、半無限地表面を有する地盤モデルが対象となる。後者の例としては3次元FEMや3次元BEMが挙げられるが、コンピュータの容量面から設ける有限境界が数値解の精度を左右する。これらの解法では立体的な地盤モデルを取り扱えるが、コストパフォーマンスの面で少なからず問題が生じる。

上記のような問題に対処するため、振動荷重の走行方向に波動場を波数分解し、走行方向と直交する横断面の波動場で数値解析する手法が採用されている。横断面は2次元波動場となるため、この解析法は擬似3次元解析や2.5次元解析と呼ばれている。Hwangら⁴⁾は、直方体要素を用いた3次元FEMにおいて、調和波が伝搬する方向の要素長を微小量とする極限操作によって、3次元波動場を2次元波動場に縮減している。花里ら⁵⁾は、Hwangらの方法を拡張して、攪乱領域の有限要素と不攪乱領域(遠方領域)の薄層要素を伝達境界で連結し、また外乱をフーリエ級数展開することによって、走行振動荷重による地盤振動を2次元波動場で解析している。これらの論文では、定式はFEM、TLMともに物理的考察に基づいて、調和波が伝搬する方向の要素長を微小にする極限を取っている。

一方、走行振動荷重による地盤振動解の定式を数理的に行う場合、TLMでは水平空間と時間に関するフーリエ変換と深さ方向への薄層要素離散化を利用しており、定式の考え方は固定点で加振する場合と同じである。また、FEM、BEMにおいても、運動方程式に空間・時間に関するフーリエ変換を施し、FEMの剛性マトリックス、BEMの変位・応力基本解を求める考え方は固定点で加振する場合と同様である。固定点での加振の場合と違う点は、走行振動荷重の走行方向に関するフーリエ変換がディラックのデルタ関数で表されることから、フーリエ変換した像空間での解を逆変換する際、走行方向の波数に関する逆変換は解析的に得られことである。したがって、走行方向と直交する横断面の2次元波動場での解の定式となるが、自由度としては3次元波動場と同じ自由度を持つことになる。

振動荷重が盛土や掘削構造の立体道路を走行する場合、花里ら⁵⁾の論文に見られるように、FEMとTLMのハイブリッド法は有用である。また、竹宮ら⁶⁾は、盛土軌道のシミュレーションに2.5次元FEMとTLMの加振解を基本解とするBEMとのハイブリッド法を用いている。一方、廣瀬ら⁷⁾は、2.5次元BEMを用いて、防振壁や溝による振動遮断現象を取り扱っている。

本報告は、廣瀬らと同様に2.5次元BEMを適用して、盛土・掘削道路における沿道地盤振動のユニットパターン(単一の振動荷重が走行するとき、沿道地盤の振動加速度レベルが示す時間変化のパターン)を比較したものである。2.5

次元 BEM の基本解は、福和ら⁸⁾によって与えられており、廣瀬らの論文にも示されているが、一般に利用し易い形では与えられていない。本報告は、基本解を利用しやすい形で表示することと、盛土・掘割道路における交通振動の予測を取り扱うための資料を提供すること目的としている。

道路交通振動の環境アセスメントでは、旧建設省土木研究所が提案した予測式⁹⁾が用いられており、予測式の係数は国土交通省において実測したデータに基づいて、定期的に見直しが行われている。一方、日本騒音制御工学会から、物理数学的なモデルに基づいた平面道路の予測式¹⁰⁾が提案されており、騒音の場合と同じ考え方で、ユニットパターンを用いて等価振動加速度レベルを求めている。環境アセスメントにおいて、振動予測の信頼性の向上のため学会式の今後の発展が望まれることから、盛土・掘割道路の予測法の提案も行われている¹¹⁾が、用いるユニットパターンに数理的な裏付けがなされていない。本報告は、数理的な裏付けを与えるための一環として、盛土高さや掘割深さ、走行荷重の振動数、走行速度の影響について調べたものである。

2. 変位基本解の誘導

x, y 軸を平面、 z 軸を深さ方向とする。荷重振幅 P_i ($i = x, y, z$)、円振動数 p の調和振動荷重が x 軸上を一定速度 V で走行する場合を考える。このとき、走行振動荷重 X, Y, Z は次式のように表される。

$$\begin{aligned} X &= P_x e^{ipx} \delta(x-Vt) \delta(y) \delta(z) \\ Y &= P_y e^{ipy} \delta(x-Vt) \delta(y) \delta(z) \\ Z &= P_z e^{ipz} \delta(x-Vt) \delta(y) \delta(z) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 δ はディラックのデルタ関数を表す。いま、式(1)を空間-時間に関してフーリエ変換すれば次式となる。

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_x e^{ipx} \delta(x-Vt) \delta(y) \delta(z) e^{i(\xi x + \eta y + \zeta z - \omega t)} dx dy dz dt \\ &= \frac{2\pi P_x}{V} \delta\left(\xi - \frac{\omega - p}{V}\right) \\ \hat{Y} &= \frac{2\pi P_y}{V} \delta\left(\xi - \frac{\omega - p}{V}\right) \\ \hat{Z} &= \frac{2\pi P_z}{V} \delta\left(\xi - \frac{\omega - p}{V}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

上式において、 ξ, η, ζ はそれぞれ x, y, z 方向の波数、 ω は円振動数である。また、記号 \wedge は波数 ξ の領域、 \sim は波数 η, ζ の 2次元領域、 $\bar{\sim}$ は周波数領域の関数を表す。

ナビエの運動方程式をフーリエ変換し、マトリックス表示すると次式で表される。

$$\begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)\xi^2 + \mu(\eta^2 + \zeta^2) - \rho\omega^2 & (\lambda + \mu)\xi\eta \\ (\lambda + \mu)\xi\eta & (\lambda + 2\mu)\eta^2 + \mu(\xi^2 + \zeta^2) - \rho\omega^2 \\ (\lambda + \mu)\xi\zeta & (\lambda + \mu)\eta\zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u} \\ \hat{v} \\ \hat{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 λ, μ はラーメの定数、 ρ は地盤の密度を表す。式(3)の係数行列の逆行列を求め、各方向の加振力 X, Y, Z に対する各変位を部分分数の形で表す。

$$\hat{u} = \frac{1}{\mu\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} \hat{X} - \frac{\xi^2}{\mu k_s^2} \left[\frac{1}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{1}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{X} \quad (4)$$

$$\hat{v} = -\frac{\xi}{\mu k_s^2} \left[\frac{\eta}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\eta}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{X} \quad (5)$$

$$\hat{\hat{w}} = -\frac{\xi}{\mu k_s^2} \left[\frac{\zeta}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\zeta}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{X}} \quad (6)$$

$$\hat{\hat{u}} = -\frac{\xi}{\mu k_s^2} \left[\frac{\eta}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\eta}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{Y}} \quad (7)$$

$$\hat{\hat{v}} = \frac{1}{\mu \{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} \hat{\hat{Y}} - \frac{1}{\mu k_s^2} \left[\frac{\eta^2}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\eta^2}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{Y}} \quad (8)$$

$$\hat{\hat{w}} = -\frac{1}{\mu k_s^2} \left[\frac{\eta \zeta}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\eta \zeta}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{Y}} \quad (9)$$

$$\hat{\hat{u}} = -\frac{\xi}{\mu k_s^2} \left[\frac{\zeta}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\zeta}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{Z}} \quad (10)$$

$$\hat{\hat{v}} = -\frac{1}{\mu k_s^2} \left[\frac{\eta \zeta}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\eta \zeta}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{Z}} \quad (11)$$

$$\hat{\hat{w}} = \frac{1}{\mu \{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} \hat{\hat{Z}} - \frac{1}{\mu k_s^2} \left[\frac{\zeta^2}{\{\kappa^2 - (k_s^2 - \xi^2)\}} - \frac{\zeta^2}{\{\kappa^2 - (k_p^2 - \xi^2)\}} \right] \hat{\hat{Z}} \quad (12)$$

式(4)~(12)に y, z 軸に関するフーリエ逆変換を施せば、各変位解は以下の各式となる。

$$\hat{\hat{u}} = -\frac{i}{4\mu} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{\xi^2}{k_s^2} \{H_0^{(2)}(K_s r) - H_0^{(2)}(K_p r)\} \right] \hat{\hat{X}} \quad (13)$$

$$\hat{\hat{v}} = \frac{\xi}{4\mu k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \hat{\hat{X}} \quad (14)$$

$$\hat{\hat{w}} = \frac{\xi}{4\mu k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \hat{\hat{X}} \quad (15)$$

$$\hat{\hat{u}} = \frac{\xi}{4\mu k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \hat{\hat{Y}} \quad (16)$$

$$\hat{\hat{v}} = -\frac{i}{4\mu} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{1}{k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} + \frac{y^2}{k_s^2 r^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \right] \hat{\hat{Y}} \quad (17)$$

$$\hat{\hat{w}} = -\frac{i}{4\mu k_s^2 r^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \hat{\hat{Y}} \quad (18)$$

$$\hat{\hat{u}} = \frac{\xi}{4\mu k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \hat{\hat{Z}} \quad (19)$$

$$\hat{\hat{v}} = -\frac{i}{4\mu k_s^2 r^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \hat{\hat{Z}} \quad (20)$$

$$\hat{\hat{w}} = -\frac{i}{4\mu} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{1}{k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} + \frac{z^2}{k_s^2 r^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \right] \hat{\hat{Z}} \quad (21)$$

ただし、 $K_s^2 = k_s^2 - \xi^2$ 、 $K_p^2 = k_p^2 - \xi^2$ 、 $r^2 = y^2 + z^2$ である。

式(13)~(21)の変位解に対して、 x 軸に関するフーリエ逆変換を施す。 X, Y, Z は式(2)のように与えられているので、式(13)のフーリエ逆変換は次式のようになる。

$$\bar{u} = -\frac{iP_x}{4\mu V} \int_{-\infty}^{\infty} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{\xi^2}{k_s^2} \{H_0^{(2)}(K_s r) - H_0^{(2)}(K_p r)\} \right] \delta\left(\xi - \frac{\omega - p}{V}\right) e^{-i\xi x} d\xi$$

上式の積分はデルタ関数の性質より、 $\xi = (\omega - p)/V$ のときのみ意味を持つ。

$$\bar{u} = -\frac{iP_x}{4\mu V} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{D^2}{k_s^2} \{H_0^{(2)}(K_s r) - H_0^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} \quad (22)$$

ただし、

$$D = \frac{\omega - P}{V}, \quad K_s^2 = k_s^2 - D^2, \quad K_p^2 = k_p^2 - D^2$$

さらに、式(22)を時間に関してフーリエ逆変換する。

$$u = -\frac{iP_x}{8\pi\mu V} \int_{-\infty}^{\infty} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{D^2}{k_s^2} \{H_0^{(2)}(K_s r) - H_0^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega t} d\omega$$

ここで、上式の ω に関する無限積分は、 $-T/2 \leq t \leq T/2$ の有限時間長に対して定義される $\omega_n = 2\pi n/T$ ($-N/2 \leq n \leq N/2$)の離散点における被積分関数の和に置き換える。

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-N/2}^{N/2} f(\omega_n) e^{i\omega_n t} (2\pi/T) = \frac{1}{T} \sum_{n=-N/2}^{N/2} f(\omega_n) e^{i\omega_n t}$$

これより、式(13)は次式のように書き換えられる。

$$u = -\frac{iP_x}{4\mu VT} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{D^2}{k_s^2} \{H_0^{(2)}(K_s r) - H_0^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (23)$$

同様に、他に変位解も以下のように求まる。

$$v = \frac{P_x}{4\mu VT} \left(\frac{y}{r} \right) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[\frac{D}{k_s^2} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (24)$$

$$w = \frac{P_x}{4\mu VT} \left(\frac{z}{r} \right) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[\frac{D}{k_s^2} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (25)$$

$$u = \frac{P_y}{4\mu VT} \left(\frac{y}{r} \right) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[\frac{D}{k_s^2} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (26)$$

$$v = -\frac{iP_y}{4\mu VT} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{1}{k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \right. \\ \left. + \frac{y^2}{k_s^2 r^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (27)$$

$$w = -\frac{iP_y}{4\mu VT} \left(\frac{yz}{r^2} \right) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[\frac{1}{k_s^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (28)$$

$$u = \frac{P_z}{4\mu VT} \left(\frac{z}{r} \right) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[\frac{D}{k_s^2} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (29)$$

$$v = -\frac{iP_z}{4\mu VT} \left(\frac{yz}{r^2} \right) \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[\frac{1}{k_s^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (30)$$

$$w = -\frac{iP_z}{4\mu VT} \sum_{n=-N/2}^{N/2} \left[H_0^{(2)}(K_s r) - \frac{1}{k_s^2 r} \{K_s H_1^{(2)}(K_s r) - K_p H_1^{(2)}(K_p r)\} \right. \\ \left. + \frac{z^2}{k_s^2 r^2} \{K_s^2 H_2^{(2)}(K_s r) - K_p^2 H_2^{(2)}(K_p r)\} \right] e^{-iDx} e^{i\omega_n t} \quad (31)$$

応力-ひずみ関係式に式(23)~(31)を代入すれば、各方向の加振力 X, Y, Z に対する各応力解を求めることができる。

3. 解析モデルと数値計算法の確認

図-1に盛土・掘削道路の解析モデルの概略図を示す。図中、 P_z は走行する鉛直加振力、 H は盛土高さ、 D は掘削深さである。測点は、法端から1.5m点を測点1(基準点)として、5mピッチで測点5までとする。盛土道路の高さが5m以下の場合、法勾配は1:1.5~1:1.8が目安とされている。掘削道路でも、同じ法勾配と仮定する。本報告では、道路面の幅を $W=11\text{m}$ 、法勾配を 30° (約1:1.7)に固定する。走行荷重はBEMの分割長に合わせて1m幅の分布荷重とし、道路面の中央を走行させる。また、対応原理を用いて、粘弾性地盤として解析する。

地盤定数は、横波の伝搬速度が 200m/s 、密度が 1.8t/m^3 、ポアソン比が $1/3$ 、減衰定数が 0.02 とする。また、荷重振幅は 9.8kN/m とする。盛土高さが $H=3\text{m}$ 、掘削深さが $D=3\text{m}$ 、走行荷重の速度が $V=60\text{km/h}$ 、振動数が $f=10\text{Hz}$ を基準と

して、高さあるいは深さを $H(D) = 2m, 3m, 5m$, 走行速度を $V=60km/h, 80km/h, 100km/h$, 振動数を $f=5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz$ に変化させる。

2.5次元 BEM の基本解およびプログラムを確認するため、二層粘弾性地盤に対する鉛直変位を理論解と比較して図-2, 図-3 に示す。地盤定数は省略するが、表層の厚さは 10m で、走行速度、振動数、測点の走行路からの離隔距離は図中に示す値である。なお、理論解は、文献 12)の集中荷重に対するプログラムを分布荷重に改造して計算した。

図-2, 図-3 より、2.5次元 BEM による数値解は理論解と良く一致していることが分かる。ここで、円振動数の離散点 ω_n で与えられる変位のスペクト

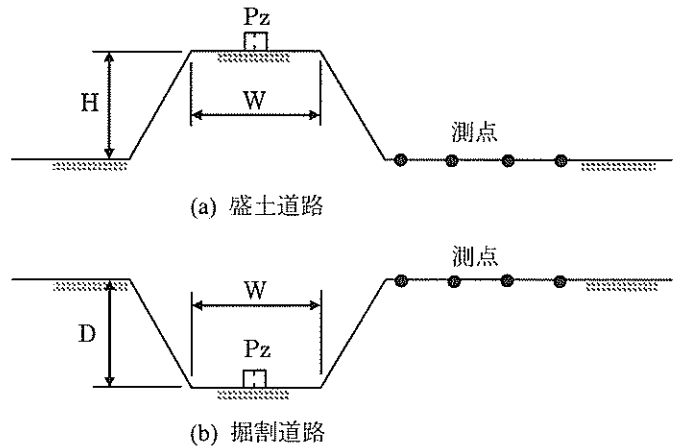


図-1 数値解析モデル

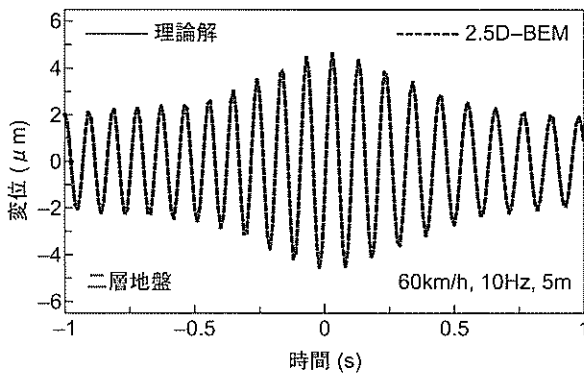


図-2 変位波形の比較

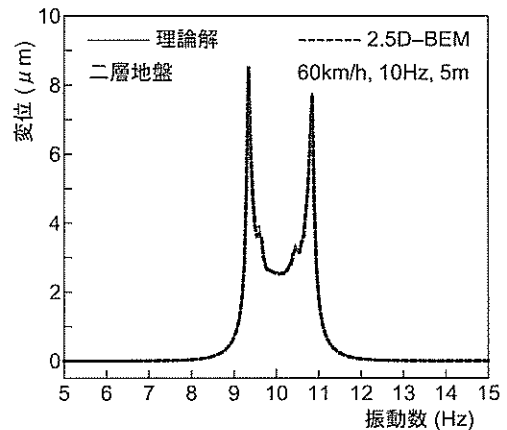


図-3 変位スペクトルの比較

ルを描いたものが図-3 である。同図は、変位が生じるのは走行荷重の振動数 10Hz の前後に 2Hz の範囲以内であることを示しており、 $-N\pi/T \leq \omega_n \leq N\pi/T$ の範囲は走行荷重の振動数の前後に 3Hz 程度の範囲を考慮しておけばよいことを示している。また、同図で 10Hz を挟んで 2つのピークが生じているが、これはドップラー効果を表しており、高い方のピークは走行荷重が測点に近付いてくるとき、低い方のピークは測点から遠ざかるときの振動数である。2つのピークの振動数はドップラー効果によるものであるため、走行荷重の振動数が高くなるとその前後に 3Hz 程度の範囲で十分であるか確かめておく必要がある。

図-4 は、半無限粘弾性地盤に対して、走行荷重の振動数が変位スペクトルに与える影響を調べたものである。振動数が高くなると、時間に関するフーリエ逆変換で必要とする振動数範囲は広がることが分かる。

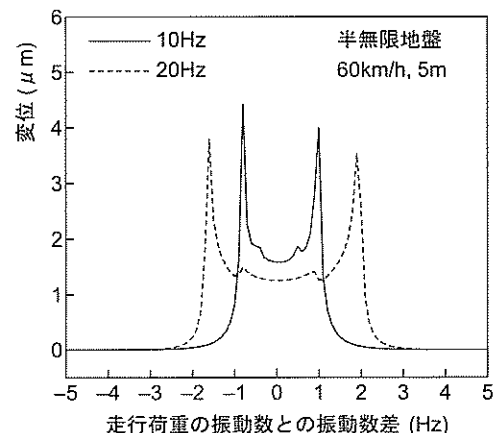


図-4 走行荷重の振動数の影響

4. 走行荷重の振動数とユニットパターンの変化

図-5～図-7 は、平面道路と図-1 に示す盛土道路、掘割道路について、走行荷重の振動数を変化させたとき、走行路から離隔距離がユニットパターンに及ぼす影響を調べたものである。なお、平面における加振中心からの距離は、盛

土および掘割の法端からの距離と水平距離で一致させてある。また、横軸は、測点から走行路に下ろした垂線の交点を0秒として、マイナス側が接近側、プラス側が遠ざかる側の時間を表している。

平面ではユニットパターンは0秒に対して概ね対称になっているが、盛土、掘割では対称性が崩れる傾向にある。例えば、盛土の5Hz以外では、距離が大きくなるとともに、ユニットパターンのピークが接近側にずれている。また、1.5mと6.5mの測点間でユニットパターンのピークが大きく下がっている。掘割では、ユニットパターンのピークは平面より小さく、振動数が高くなるとともに、ユニットパターンに揺らぎが生じている。一方、5Hzのユニットパターンは、盛土、平面、掘割の順に距離による変化がやや小さくなる様子を示しているが、総じて似た形状となっている。振動数が小さくなるとともに、伝搬する波動の波長が長くなり、盛土、掘割の形状に影響され難くなることを示していると考えられる。

以上より、走行荷重の振動数は盛土・掘割道路のユニッ

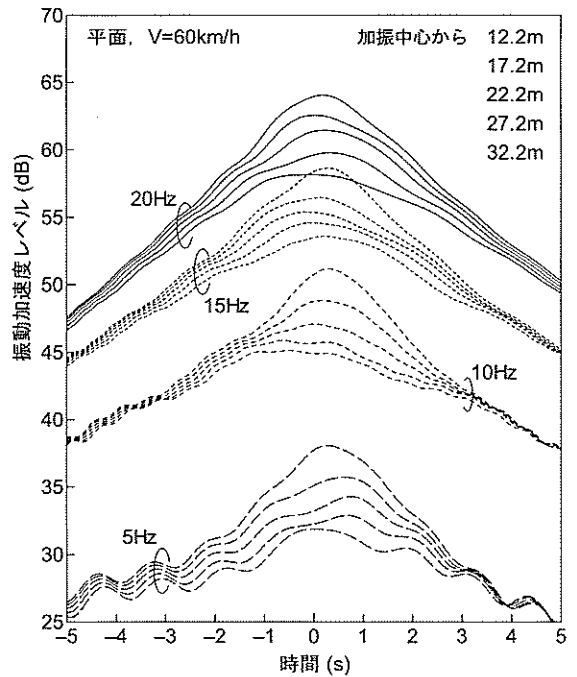


図-5 平面道路における走行荷重の振動数とユニットパターンの関係

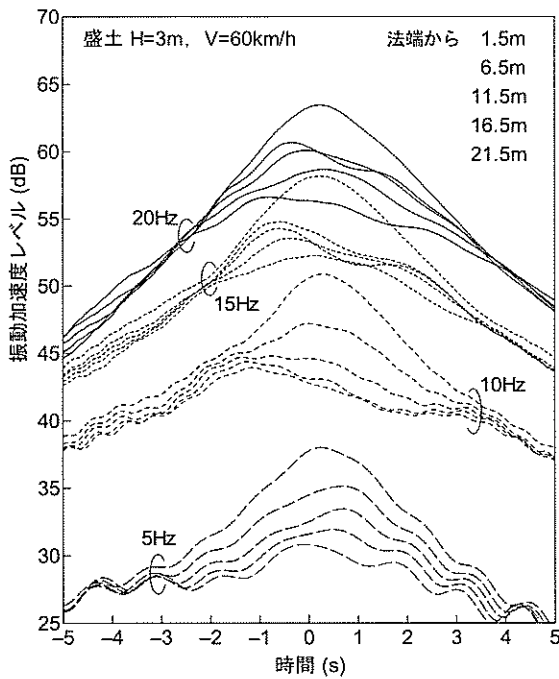


図-6 盛土道路における走行荷重の振動数とユニットパターンの関係

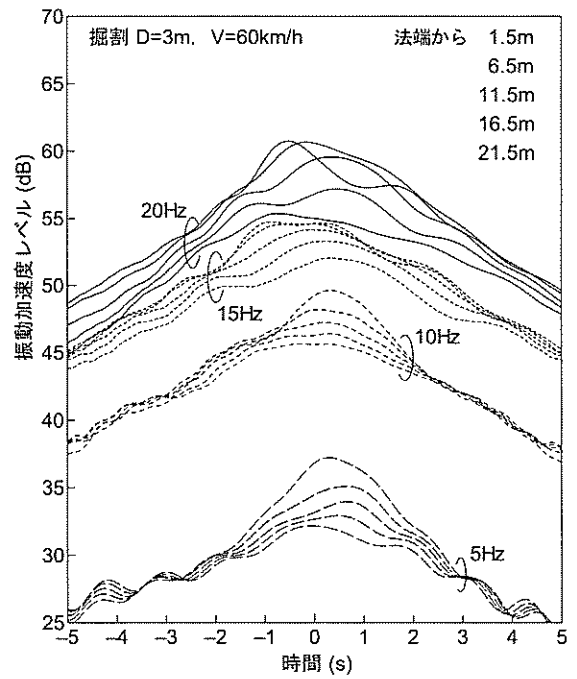


図-7 掘割道路における走行荷重の振動数とユニットパターンの関係

トパターンに影響を与えるが、先にも述べたように $f=10\text{Hz}$ を基準として、次章では盛土高さ、掘割深さと走行速度の影響を調べる。ところで、文献13)では、路面凹凸を通過する自動車の接地荷重に対するシミュレーションにおいて、接地荷重をフーリエ級数展開し、展開各項の振動数に対して数値解を求めて合成する手法を示した。しかし、この手法は、2.5次元BEMを利用する場合は膨大な計算量となるため、簡単には利用し難い。そこで、本報告では、道路沿道の地盤振動に影響が大きいと言われている10数Hzの自動車のばね下振動数に近い $f=10\text{Hz}$ を対象とすることにした。

5. ユニットパターンへの Bornitz 式の当てはめ

日本騒音制御工学会の平面道路の予測式では、振動伝搬の指向性や加振点から 15m までは実体波の距離減衰が取り入れられているが、表面波に対する Bornitz の経験式をベースとしたユニットパターンが用いられている。また、盛土・掘割道路に対する予測式の提案¹¹⁾では、平面の場合に加えて、振動伝搬の波線が折れ曲がることによる回折角を取り入れているが、この場合もユニットパターンは Bornitz 式をベースとしている。本報告では、盛土高さあるいは掘割深さ、走行速度を変化させたときのユニットパターンを示すとともに、Bornitz 式を用いて作成したユニットパターンの適合性についても調べる。

ここで、Bornitz 式に基づくユニットパターンは、荷重位置を走行速度に合わせて移動させ、Bornitz 式で計算される測点の加速度レベルを連ねた時間関数である。いま、表面波に対する Bornitz 式を対数表示すれば次式で与えられる。

$$L_a = 20 \log C - 10 \log r - 8.68 \alpha r \tag{32}$$

ここに、 L_a は加速度レベル、 r は振源距離、 α は地盤の減衰係数である。また、 C は振動源の加振力に関する係数であるが、単純には定まらない。ここでは、 $C=1$ として相対的なユニットパターンを求めて、走行振動荷重に対する測点 1 (基準点) のユニットパターンのピークレベル値に合わせる。

図-8~図-10 は、盛土高さ、掘割深さを 3m、走行荷重の振動数を 10Hz に固定して、走行速度が 60km/h、80km/h、100km/h のとき、法端からの距離によるユニットパターンの変化を調べたものである。同図には、Bornitz 式によるユニットパターンも合わせて図示した。なお、地盤の減衰係数 α は振動数に依存するが、ここでは 10Hz の振動数における

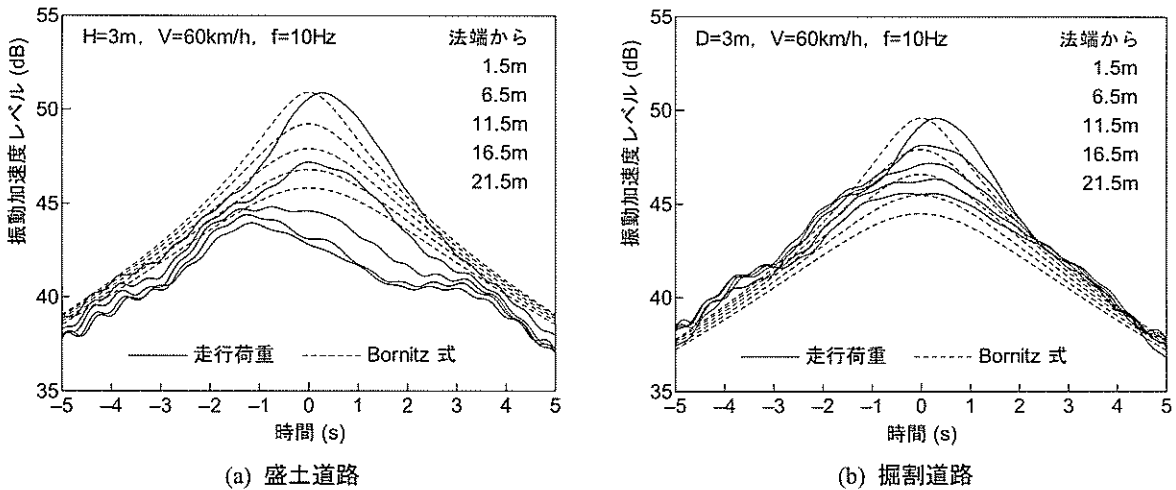


図-8 走行速度が 60km/h のときのユニットパターン (盛土高さ、掘割深さ 3m)

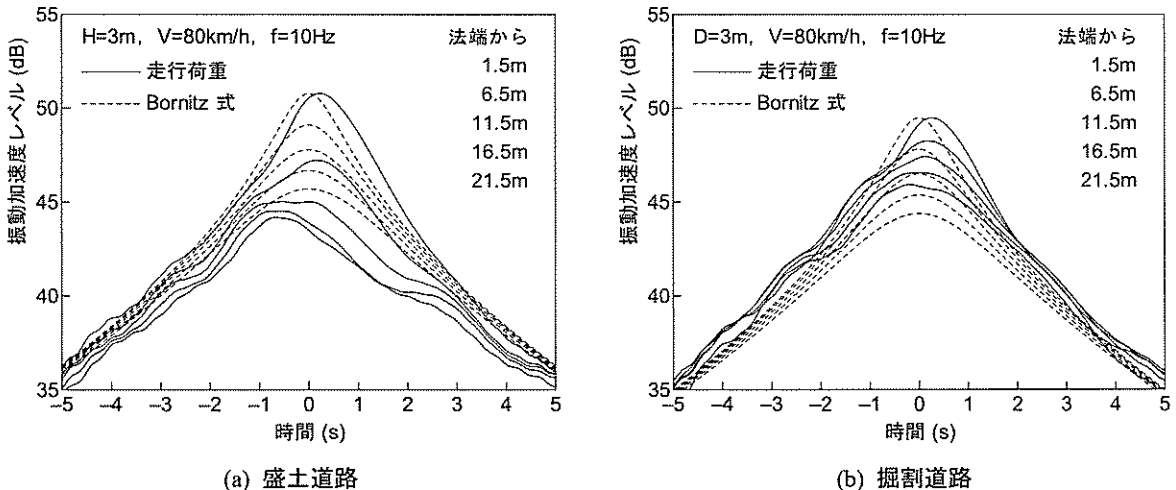


図-9 走行速度が 80km/h のときのユニットパターン (盛土高さ、掘割深さ 3m)

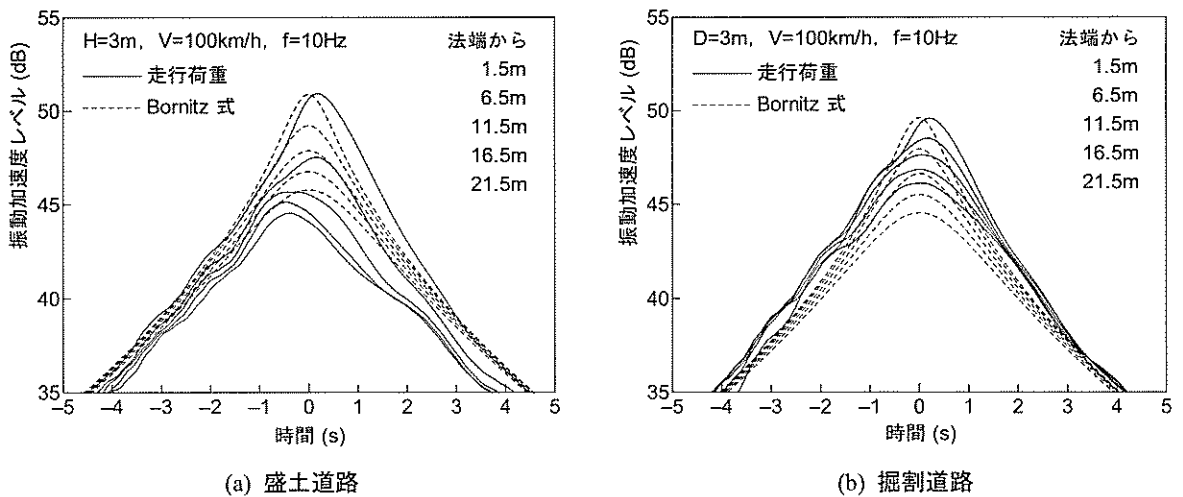


図-10 走行速度が100km/hのときのユニットパターン（盛土高さ、掘割深さ3m）

減衰係数 α に固定した。

盛土道路、掘割道路ともに、走行速度が変わっても走行荷重によるユニットパターンと Bornitz 式によるユニットパターンは似通っている。しかし、法端からの距離が大きくなるとともに、盛土では走行荷重によるユニットパターンのレベルが Bornitz 式によるユニットパターンのレベルよりも小さくなっている。一方、掘割では、盛土の場合と逆に、Bornitz 式によるユニットパターンのレベルが小さくなっている。盛土の走行荷重によるユニットパターンでは、1.5m から 6.5m の測点間でレベルが急に小さくなっているが、掘割のユニットパターンではそのような違いは生じていない。盛土と掘割では走行荷重から伝搬する波動の伝搬経路の状況が異なることが考えられるので、盛土および掘割の法面部分も含めた距離減衰状況を精査してみる必要がある。

図-11、図-12は、走行荷重の振動数を10Hz、走行速度を60km/hに固定して、盛土高さ、掘割深さが2mと5mのとき、法端からの距離によるユニットパターンの変化を調べたものである。同図には、Bornitz式によるユニットパターンも合わせて図示した。図-8の盛土高さ、掘割深さが3mの場合も合わせて、高さあるいは深さがユニットパターンに与える影響を概観する。盛土道路では走行速度の変化の場合と類似の傾向を示しているが、走行荷重による5mの場合のユニットパターンでは、11.5m以遠におけるユニットパターンのレベルに減少が見られない。一方、掘割道路では、2mの場合は走行荷重によるユニットパターンと Bornitz 式によるユニットパターンは良く一致しているが、3mと5mの場合には法端からの距離が大きくなるとともに、Bornitz 式によるユニットパターンのレベルが小さくなっている。また、5mでは、走行荷重によるユニットパターンのレベルは法端からの距離による減衰を示しておらず、Bornitz 式によるユ

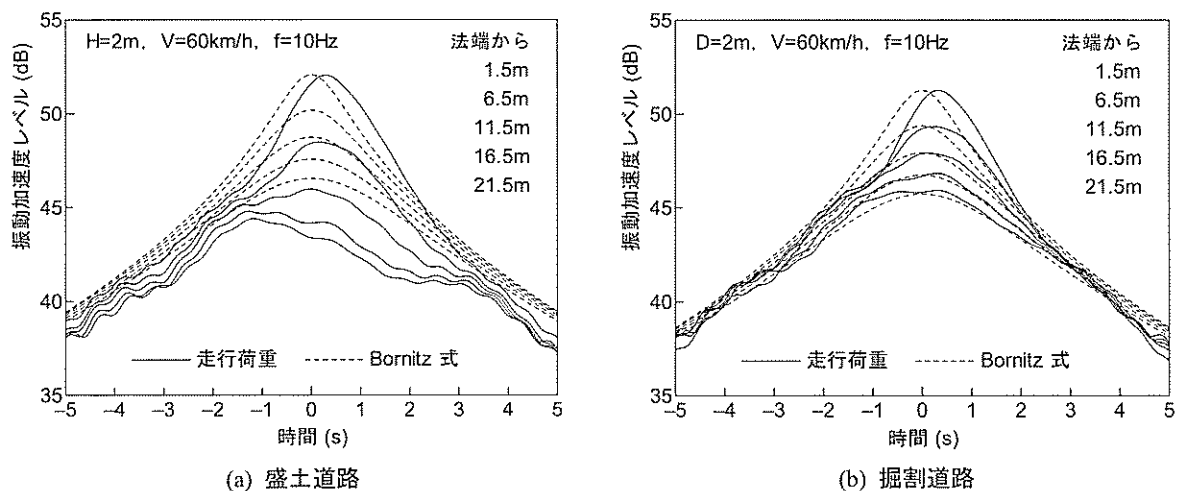


図-11 盛土高さ、掘割深さが2mのときのユニットパターン（V=60km/h）

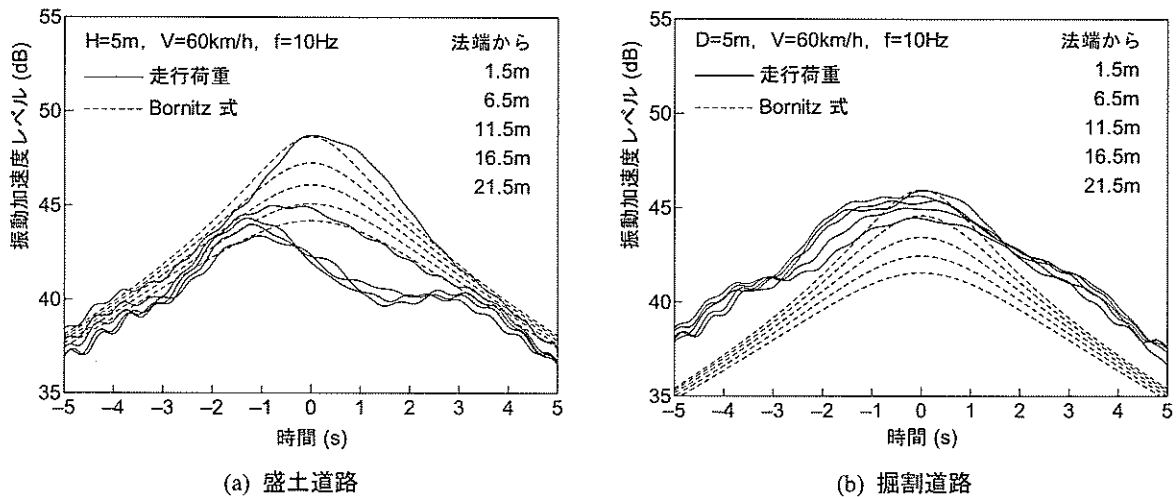


図-12 盛土高さ、掘割深さが5mのときのユニットパターン (V=60km/h)

ニットパターンと大きな違いを見せている。これについても、先述と同様に、盛土と掘割では走行荷重から伝搬する波動の伝搬経路の状況が異なることが考えられるので、法面部分も含めた距離減衰状況を精査してみる必要がある。

6. おわりに

本報告では、2.5次元BEMの基本解を利用しやすい形で表示することと、盛土・掘割道路における交通振動の予測を取り扱うための資料を提供すること目的とした。本報告で取り扱ったシミュレーションのケースは少ないが、得られた結果を整理すると以下ようになる。

- 1) 走行荷重の振動数が高くなると、時間に関するフーリエ逆変換で必要とする振動数範囲は広がるが、走行荷重の振動数を挟んで前後に3Hz程度の範囲で良い。
- 2) 走行荷重の振動数が低い5Hzでは、盛土道路、平面道路、掘割道路のユニットパターンは、総じて似た形状で、この順に距離による変化が小さくなる様子を示している。
- 3) 盛土道路における特徴についてまとめると、つぎのようになる。
 - ・距離が大きくなるとともに、5Hz以外のユニットパターンではピークが接近側にずれる傾向にある。
 - ・法端から1.5mと6.5mの測点間でユニットパターンのピークが大きく下がっている。
 - ・走行速度に関わらず、距離が大きくなるとともに、走行荷重によるユニットパターンのレベルがBornitz式によるユニットパターンのレベルより小さくなっている。
 - ・盛土高さが5mでは、11.5m以遠において、走行荷重によるユニットパターンのレベルに減少が見られない。
- 4) 掘割道路における特徴についてまとめると、つぎのようになる。
 - ・ユニットパターンのピークは平面道路の場合より小さく、走行荷重の振動数が高くなるとともに、ユニットパターンに揺らぎが生じている。
 - ・走行速度に関わらず、距離が大きくなるとともに、Bornitz式によるユニットパターンのレベルが走行荷重によるユニットパターンのレベルより小さくなっている。
 - ・深さが5mでは、走行荷重によるユニットパターンの距離による変化は小さく、Bornitz式によるユニットパターンの変化と大きな相違を見せている。

本報告では単一の調和振動荷重の走行によるユニットパターンを取り扱ったが、路面凹凸を通過する自動車の接地荷重のようにランダム振動荷重が走行する場合、例えば文献13)に示すような手法を考える必要がある。同文献では、接地荷重をフーリエ級数展開し、展開各項の振動数を有する走行荷重に対する数値解を求めて合成している。単一の調和

振動荷重が走行するとき、仮にシミュレーションの時間長を 20 秒間とした場合、振動数ピッチは 0.05Hz となる。このため、走行荷重の振動数を挟んで前後に 3Hz の範囲について、時間に関するフーリエ逆変換を行うとしても、BEM 計算を 120 回行うことになる。したがって、路面凹凸を通過する自動車の接地荷重に対するユニットパターンは膨大な計算回数となる。盛土道路に対する一つの改良策として、盛土部分に 2.5 次元 BEM、平面部分（原地盤）に 2.5 次元 TLM を用いるハイブリッド法を開発した。これによれば演算時間は約 12% に短縮されるが、膨大な計算回数に対処するためには、さらに演算時間短縮の改良策を模索する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 北村泰寿：走行変動荷重による地盤振動解析，神戸大学大学院自然科学研究科紀要，第16B，pp.53～59，1998.
- 2) 福和伸夫・西阪理永・浅野三男・多賀直恒・寺村 彰：自動車走行外乱による地盤の振動性状に関する研究－実測記録の分析と薄層法によるシミュレーション解析－，構造工学論文集，Vol.39B，pp.95～104，1993.
- 3) 源栄正人・菅原 長・永野正行：3次元成層地盤におけるMoving Green's Functionの基本的検討，日本建築学会構造系論文集，No.462，pp.51～60，1994.
- 4) R. N. Hwang and J. Lysmer：Response of Buried Structures to Traveling Waves，*Journal of Geotechnical Engineering Division*，ASCE，Vol.107，No.GT2，pp.183～200，1981.
- 5) 花里利一・鶴飼恵三：走行荷重により生じる地盤振動のFEM解析，土質工学会論文報告集，Vol.23，No.1，pp.144～150，1983.
- 6) 竹宮宏和・合田和哉：移動加振源による多成層地盤上の盛土構造の振動評価へのFEM-BEMの適用，土木学会論文集，No.605/I-45，pp.143～152，1998.
- 7) 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.
- 8) 福和伸夫・梅村健次・多賀直恒：等速移動点加振力に対する 3 次元均質等方弾性体の基本解に関する研究－交通振動による地盤の応答性状に関する解析的研究－，日本建築学会構造系論文報告集，No.441，pp.45～52，1992.
- 9) 道路環境研究所：道路環境影響評価の技術手法 2007改訂版，第2巻，pp.304～313，2007.
- 10) 日本騒音制御工学会道路交通振動予測式作成分科会：道路交通振動予測計算方法（INCE/JRTV-MODEL 2003），騒音制御，Vo.28，No.3，pp.207～216，2004.
- 11) 横田明則・内田季延・佐野康之：盛土及び切土道路からの交通振動の予測手法－ユニットパターンによる予測－，日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集，pp.69～72，2009.
- 12) 松尾幸治・北村泰寿：移動調和振動荷重による二層弾性体表面の振動解析，土木学会関西支部年次学術講演会，1999.
- 13) 山本和宏・北村泰寿：道路交通振動レベル L_{10} のコンピュータ・シミュレーション，土木学会論文集，No.759/I-67，pp.99～110，2004.

著 者

北村 泰寿 所員，工学博士，構造力学，振動工学