

盛土・掘削道路における地盤振動シミュレーション法の検討

A Study on Simulation Technique of Ground Vibration Generated by Moving Excitation in Banked Road and Cut Road

北村 泰 寿
Yasutoshi Kitamura

1. はじめに

交通機関による沿道の地盤振動のシミュレーションにおいて、走行車両を単一振動数の走行振動荷重にモデル化し、荷重の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提案されている。横断面は 2 次元波動場となるため、この数値解析法は擬似 3 次元解析や 2.5 次元解析と呼ばれている。Hwang ら¹⁾は、直方体要素を用いた 3 次元有限要素法 (FEM) において、調和波動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²⁾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、薄層要素法 (TLM) とともに物理的考察に基づいている。一方、福和ら³⁾、源栄ら⁴⁾は数的に定式を行っており、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 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。

振動荷重が盛土道路や掘削道路を走行する場合、前掲の花里ら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。竹宮ら⁵⁾は、盛土軌道のシミュレーションに 2.5 次元解析を適用しており、FEM と TLM の加振解を基本解とする境界要素法 (BEM) とのハイブリッド法を用いている。また、Galvin ら⁶⁾は、軌道・盛土構造に FEM、原地盤に多層弾性体の 2.5 次元理論解を用いたハイブリッド法を適用している。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。しかし、これらの研究では単一振動数の走行振動荷重、もしくは複数の振動数の走行振動荷重を組み合わせた荷重を走行させており、この方法のままでは走行車両と路面凹凸の相互作用によって発生するランダム振動荷重による地盤振動を評価することはできない。

筆者は、半無限弾性地盤表面を走行する調和荷重による地盤振動の理論解を誘導し、この解を利用してランダム振動荷重に対する地盤振動を求める近似解法を提案した⁸⁾。さらに、この近似解法を利用して、1 台の車両走行による地盤振動のユニットパターンを作成し、道路交通による振動レベル L_{10} のシミュレーション方法を提案した⁹⁾。このような経緯を踏まえ、筆者は盛土道路、掘削道路の沿道について、走行車両による地盤振動のユニットパターンを求め、振動レベル L_{10} を予測する手法の開発を進めている。前報¹⁰⁾では、2.5 次元 BEM により、単一振動数の振動荷重が走行するとき、地盤振動の振動加速度レベルが示す時間変化のパターン (前報では、これをユニットパターンと呼んだ) を求め、盛土高さや掘削深さ、走行振動荷重の振動数、走行速度の影響について調べた。

路面凹凸を通過する車両の動的接地荷重のようにランダム振動荷重が走行する場合、振動荷重をフーリエ級数展開し、展開各項の振動数の走行振動荷重に対する解を求めて合成する必要がある。しかし、単一振動数の振動荷重が走行するときでも、地盤振動の振動数範囲はドップラー効果により広がることになる。したがって、この振動数範囲に対して、前報の 2.5 次元 BEM 計算をそのまま適用すれば、計算時間は極めて長時間となる。仮に筆者が使用したパソコンで計算

を行うとすれば、1台の走行車両による地盤振動のユニットパターンを求めるのに、10数回の計算時間が必要となる。本研究では、形状関数を2次関数とする2.5次元TLMを定式し、盛上道路に対しては盛土部にBEM、原地盤にTLMを用いるハイブリッド法、掘削道路に対してはTLMによる変位・応力解を基本解とするBEMを適用する。

2. 薄層要素法による変位・応力解

地表面に x, y 軸をとり、深さ $z = z_s$ の位置を荷重振幅 \mathbf{P} (3方向成分のベクトル)、円振動数 p の振動荷重が x 軸方向に一定速度 V で走行する場合を考える。

$$\mathbf{q} = \mathbf{P} e^{i p t} \delta(x - V t) \delta(y) \delta(z - z_s) \quad (1)$$

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。

$$\begin{aligned} \hat{\hat{\mathbf{q}}} &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{P} e^{i p t} \delta(x - V t) \delta(y) \delta(z - z_s) e^{i(k_x x + k_y y - \omega t)} dx dy dt \\ &= \frac{2\pi \mathbf{P}}{VT} \delta\left(k_x - \frac{\omega_n - p}{V}\right) \delta(z - z_s) \end{aligned} \quad (2)$$

上式において、 k_x, k_y は x, y 方向の波数、 ω は円振動数である。また、記号 \wedge は波数 k_x の領域、 \sim は波数 k_y, k_z の2次元領域、 $\bar{\quad}$ は振動数領域の関数を表す。

このとき、ナビエの運動方程式のフーリエ変換は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \{k_x^2(\lambda + 2\mu) + k_y^2\mu - \rho\omega_n^2\} \hat{\hat{u}} - \mu \frac{d^2 \hat{\hat{u}}}{dz^2} + k_x k_y (\lambda + \mu) \hat{\hat{v}} + i k_x (\lambda + \mu) \frac{d \hat{\hat{w}}}{dz} &= 0 \\ k_x k_y (\lambda + \mu) \hat{\hat{u}} + \{k_y^2(\lambda + 2\mu) + k_x^2\mu - \rho\omega_n^2\} \hat{\hat{v}} - \mu \frac{d^2 \hat{\hat{v}}}{dz^2} + i k_y (\lambda + \mu) \frac{d \hat{\hat{w}}}{dz} &= 0 \\ i k_x (\lambda + \mu) \frac{d \hat{\hat{u}}}{dz} + i k_y (\lambda + \mu) \frac{d \hat{\hat{v}}}{dz} + \{(k_x^2 + k_y^2)\mu - \rho\omega_n^2\} \hat{\hat{w}} - (\lambda + 2\mu) \frac{d^2 \hat{\hat{w}}}{dz^2} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 λ, μ はラーメの定数、 ρ は地盤の密度、 u, v, w は x, y, z 軸方向の変位である。式(3)から、振動数-波数領域での運動方程式は、 z に関する常微分方程式になっていることがわかる。そこで、剛基盤上の弾性体を有限個の薄層要素に分割し、運動方程式にガラキン法を適用する。厚さ H の薄層要素内 ($-H/2 \leq z \leq H/2$) で、振動数-波数領域の変位 $\hat{\hat{u}}, \hat{\hat{v}}, \hat{\hat{w}}$ を2次の形状関数で表す。

各薄層に対する式(3)にガラキン法を適用し、全薄層に対して重ね合わせると、式(3)は次式のようにマトリックスの形で表すことができる。

$$\{k_x^2 \mathbf{A} + k_x (k_y \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2) + k_y^2 \mathbf{C} + k_y \mathbf{D} + \mathbf{E} - \omega_n^2 \mathbf{M}\} \hat{\hat{\mathbf{U}}} = \hat{\hat{\mathbf{q}}} \quad (4)$$

ここに、 $\hat{\hat{\mathbf{U}}}$ 、 $\hat{\hat{\mathbf{q}}}$ は振動数-波数領域において薄層境界の変位、境界力で表されるベクトル、 $\mathbf{A}, \mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{E}, \mathbf{M}$ は薄層要素のラーメの定数、密度および薄層厚で表されるマトリックスである。

つぎに、式(4)の両辺のフーリエ逆変換を考える。まず、式(2)の k_x に関するフーリエ逆変換は、デルタ関数の性質を利用して次式で与えられる。

$$\hat{\hat{\mathbf{q}}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{\hat{\mathbf{q}}} e^{-i k_x x} dk_x = \frac{\mathbf{P}}{VT} \int_{-\infty}^{\infty} \delta\left(k_x - \frac{\omega_n - p}{V}\right) e^{-i k_x x} dk_x = \frac{\mathbf{P}}{VT} e^{-i \frac{\omega_n - p}{V} x} \quad (5)$$

このとき、式(4)の左辺は右辺の荷重項の関数になることから、左辺も $k_x = (\omega_n - p)/V$ のときのみ値を持つことになる。したがって、式(4)において $k_x = (\omega_n - p)/V$ と置けば、式(4)は k_y に関する2次式となる。さらに、この式をFossの解法を適用したモード解析により解くため、次式のように書き直す。

$$-k_y \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & -\mathbf{C} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\hat{\mathbf{U}}} \\ k_y \hat{\hat{\mathbf{U}}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{G} \\ \mathbf{G} & \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \hat{\hat{\mathbf{U}}} \\ \hat{\hat{\mathbf{q}}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{0} \\ \hat{\hat{\mathbf{q}}} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ただし、

$$\mathbf{F} = \left(\frac{\omega_n - p}{V} \right) \mathbf{B}_1 + \mathbf{D} \quad (7)$$

$$\mathbf{G} = \left(\frac{\omega_n - p}{V} \right)^2 \mathbf{A} + \left(\frac{\omega_n - p}{V} \right) \mathbf{B}_2 + \mathbf{E} - \omega_n^2 \mathbf{M}$$

式(6)の固有問題を解き、固有モードの直交性を適用すれば、 $\{\bar{\mathbf{U}}_k, \bar{\mathbf{U}}_k^*\}^T$ が解析的に得られる。さらに、 $\{\bar{\mathbf{U}}\}$ の k_y に関する逆変換に留数の定理を適用すれば、 $\{\mathbf{U}\}$ は閉じた形の解として次式となる。

$$\bar{\mathbf{U}}(x, y, \omega_n) = i \mathbf{H}(x, y) \bar{\mathbf{q}} \quad (8)$$

ただし、 $\mathbf{H}(x, y)$ は固有値、固有ベクトルで構成され、座標 x, y に関係し、次式で与えられる。

$$\mathbf{H}(x, y) = \begin{cases} \boldsymbol{\Phi} \mathbf{K} \boldsymbol{\Phi}^{-1} (\boldsymbol{\Phi}^* \mathbf{k}^* \boldsymbol{\Phi}^{*-1} - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{k} \boldsymbol{\Phi}^{-1})^{-1} \mathbf{C}^{-1} & (y > 0) \\ \boldsymbol{\Phi}^* \mathbf{K}^* \boldsymbol{\Phi}^{*-1} (\boldsymbol{\Phi}^* \mathbf{k}^* \boldsymbol{\Phi}^{*-1} - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{k} \boldsymbol{\Phi}^{-1})^{-1} \mathbf{C}^{-1} & (y < 0) \end{cases} \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{q}} = \frac{\mathbf{P}}{VT} e^{-i \left(\frac{\omega_n - p}{V} \right) x} \quad (10)$$

ここに、 \mathbf{k} は虚部が負の複素固有値、 \mathbf{k}^* は虚部が正の複素固有値、 $\boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\Phi}^*$ は固有値 \mathbf{k}, \mathbf{k}^* に対応する固有モード、 \mathbf{K}, \mathbf{K}^* は指数関数 $\exp(-ik_y^s y), \exp(-ik_y^{s*} y)$ で構成される対角マトリックスである。ただし、 k_y^s, k_y^{s*} は s 次数の固有値である。さらに、式(8)の ω_n に関するフーリエ逆変換は次式となる。

$$\mathbf{U}(x, y, t) = i \sum_{n=-\infty}^{\infty} \mathbf{H}(x, y) \mathbf{q} \quad (11)$$

ただし、

$$\mathbf{q} = \frac{\mathbf{P}}{VT} e^{-i \left(\frac{\omega_n - p}{V} \right) x} e^{i \omega_n t} = \frac{\mathbf{P}}{VT} e^{i \frac{p}{V} x} e^{-i \omega_n \left(\frac{x}{V} - t \right)} \quad (12)$$

式(11)により変位解が求まるが、 $n = -\infty \sim \infty$ は現実的な処理ではないので、 n を有限の範囲とすれば式(11)は次式のように書き換えられる。

$$\mathbf{U}(x, y, t) = i \sum_{n=-N}^N \mathbf{H}(x, y) \mathbf{q} \quad (13)$$

ただし、 $-N\pi/T \leq \omega_n \leq N\pi/T$ で、 T は振動荷重の走行の継続時間 ($1/T$ は振動数ステップ) である。なお、半無限地盤を模擬するため、最下端の境界に粘性境界を導入して、下降波のエネルギーを吸収させる。また、粘弾性体として取り扱うため、対応原理を適用する。

任意点の変位は次式で得られる。

$$\begin{aligned} u &= N_1 u_1 + N_2 u_2 + N_3 u_3 \\ v &= N_1 v_1 + N_2 v_2 + N_3 v_3 \\ w &= N_1 w_1 + N_2 w_2 + N_3 w_3 \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 N_1, N_2, N_3 は 2 次の形状関数である。応力は、式(14)を応力-ひずみ関係式に代入すれば得られる。

3. 解析モデルと数値計算法の検討

本報では、解析モデルおよび地盤定数には前報¹⁰⁾と同じものを用いることとし、図-1 に盛土道路、掘割道路の解析モデルの概略図を示す。盛土道路の解析には盛土部が 2.5 次元 BEM、原地盤が 2.5 次元 TLM のハイブリッド法、掘割道路の解析には 2.5 次元 TLM 解を基本解とする BEM を用いる。図-1 において、 Pz は走行する鉛直加振力、 H は盛土高さ、 D は掘割深さである。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。また、道路面の幅を $W=11\text{m}$ 、法勾配を 30° (約 1 : 1.7) とする。走行振動荷重は 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。

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。荷重振幅が 9.8kN/m

の単一振動数の振動荷重が走行する場合について、基礎的な検討を行う。計算結果は、盛土高さが $H=3\text{m}$ 、掘割深さが $D=3\text{m}$ 、荷重の速度が $V=60\text{km/h}$ 、荷重の振動数が $f=5\text{Hz}$ 、 10Hz 、 20Hz の場合について示す。

全無限解を基本解に用いる 2.5 次元 BEM では、地表面を模擬する応力自由の境界の長さ、境界積分方程式を離散化するための分割要素長など、数値計算上の問題がある。本研究では、BEM の分割要素内の変位関数には 1 次形状関数を用いており、この場合理論解と比較した筆者の既往の成果より、分割要素長は波長の約 $1/10$ 、自由境界の長さは波長の 1.5 倍程度は必要と考えている。これらのこと踏まえて

計算した前報の盛土道路、掘割道路に対する結果を比較の基準として、今回提案する手法による計算結果の精度を調べる。

盛土道路、掘割道路のいずれでも、TLM を用いるため地表面の自由境界は満足されている。また、最下端の境界までの深さを波長の 1.5 倍程度にとるとともに、最下端の境界に粘性境界を設けて波動の逸散効果を期待する。ところで、車両走行のようにランダム振動荷重が走行する場合、前報で用いた 2.5 次元 BEM では膨大な計算時間が掛るため、計算時間の短縮が本研究の主眼となる。この計算時間の短縮に効果があると考えられる事項には、以下のようなことが考えられる。

1) 振動数に関するフーリエ逆変換の振動数範囲の縮減

フーリエ逆変換において、計算する振動数範囲をできるだけ狭くする。前報では、走行振動荷重の振動数の前後 3Hz の範囲を逆変換の範囲としたが、ドップラー効果を考慮して、逆変換の範囲を減らすことを考える。走行振動荷重の振動数 (f) と観測点へ接近する側の振動数 (f_{\max}) および遠ざかる側の振動数 (f_{\min}) の関係は、ドップラー効果により次式で与えられる。

$$f_{\max} \text{ or } f_{\min} = f \frac{V_R}{V_R \pm v} \quad (\text{—: 接近側, +: 遠ざかる側})$$

ここに、 V_R はレイリー波の伝搬速度、 v は車両の走行速度である。また、 V_R と横波の伝搬速度 (V_S) の関係は地盤のポアソン比に依存する。例えば、ポアソン比が $1/3$ の場合には $V_R = 0.9325 \cdot V_S$ となるので、 $V_S = 200\text{m/s}$ 、 $v = 60\text{km/h}$ とすれば、 $f = 10\text{Hz}$ のとき $f_{\min} = 9.18\text{Hz}$ 、 $f_{\max} = 10.98\text{Hz}$ となる。この振動数を考慮して、本報では、 $(f_{\min} - 0.5\text{Hz}) \sim (f_{\max} + 0.5\text{Hz})$ の範囲を逆変換計算の振動数範囲とする。

2) 振動数に関するフーリエ逆変換の計算回数の縮減

ドップラー効果により、走行振動荷重の振動数 f が高くなるとともに、 f_{\min} と f_{\max} の間が広がる。前報より、変位スペクトルでは f_{\min} と f_{\max} の付近でスペクトルは急変しているが、この部分を除けばスペクトルの変化は緩やかである。この緩やかな部分に対して計算する振動数の個数を減らし、3 次スプライン補間を利用して所要の振動数間隔のスペクトルを作成する。

一例として、図-2 に掘割道路で走行振動荷重の振動数が 10Hz のときの変位スペクトルを示す。同図に示す範囲が $(f_{\min} - 0.5\text{Hz}) \sim (f_{\max} + 0.5\text{Hz})$ となっており、上記 1) の取り扱いが適切であることが分かる。また、図中の黒丸印は 3 次スプライン補間を施した範囲と結果で、補間は十分な精度を有していることが分かる。後述するが、本報では取り扱う最高振動数を 20Hz としている。図-3 は、スプライン補間の範囲が最も広い 20Hz の振動数の走行振動荷重に対して、掘割道路における地盤振動のユニットパターンを示したものである。図中の「補間あり」は 2 個の振動数の間引きを行った変位スペクトルにスプライン補間を施して求めたユニットパターンで、「補間なし」と若干の差異が見られるが、その精度は実用的には十分であることが分かる。

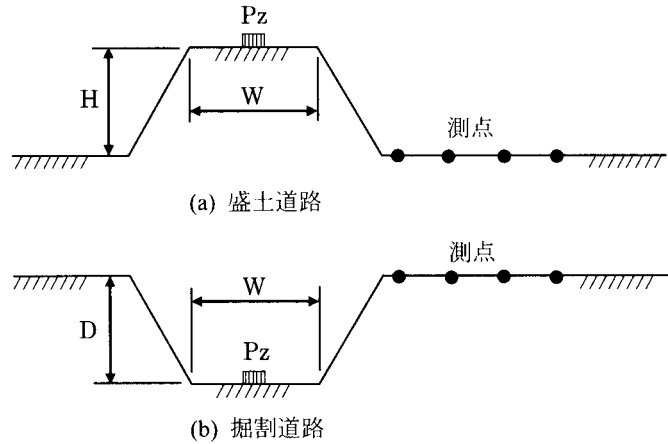


図-1 数値解析モデル

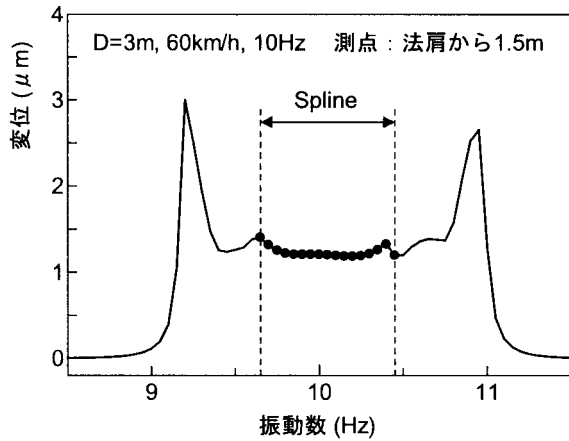


図-2 スプライン補間の例 (掘割道路, 10Hz)

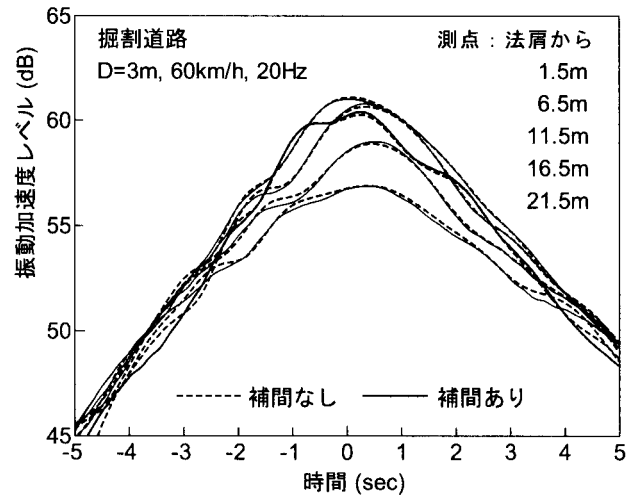


図-3 スプライン補間の影響 (掘割道路, 20Hz)

3) TLMの最下端境界の深さに対する検討

筆者の既往の研究では、薄層要素内の変位関数に1次形状関数を用いる場合、BEMの分割要素長と同じく、薄層厚は波長の約 $1/10$ としてきた。本研究では2次形状関数を用いるため、薄層内に中間境界が挿入されることから、薄層厚は波長の約 $1/5$ で同等の分割数となる。盛土道路の場合、盛土部にBEM、原地盤にTLMを用いるハイブリッド法であるため、TLMでは表面(BEMとTLMの接触部)における力-変位関係だけが必要となる。図-4は、走行振動荷重の振動数 5Hz に対して最下端境界の深さの影響を調べたものである。 $f=5\text{Hz}$, $V_s=200\text{m/s}$ であるから、最下端の境界までの深さ(B)を波長の1.5倍とすれば $B=60\text{m}$ となる。この場合、TLMに1次形状関数を用いており、薄層厚は波長の $1/10$ の $\Delta h=4\text{m}$ で十分であるが、全振動数範囲に対して薄層厚を変化させない計算方法を取ったため、 20Hz での薄層厚も $\Delta h=1\text{m}$ となっている。同図より、接近側(負の時刻側)でやや精度が悪いが、ピークの値より 10dB 以上小さいので問題はない。

掘割道路の場合には、TLMで変位・応力の基本解を求める必要があり、応力解の精度が大きな問題となる。1次形状関数の場合、薄層要素内で応力は一定となるため、薄層厚を小さくとっても十分な精度が得られないことが試行計算でも分かった。一方、2次形状関数では薄層要素内の応力は1次関数となるので、精度の改善は期待できる。図-5は、掘割道路の斜面部では薄層厚をBEMの分割要素の鉛直幅と一致させるため $\Delta h=0.5\text{m}$ 、掘割部より以深の地盤では $\Delta h=2\text{m}$ としたときの結果である。ピークの値がBEMより若干大きい、パターンもほぼ一致しており、おおむね良好な結果と言える。なお、薄層厚 $\Delta h=2\text{m}$ は、図-4の1次形状関数の場合に $\Delta h=1\text{m}$ としたことに対応させた

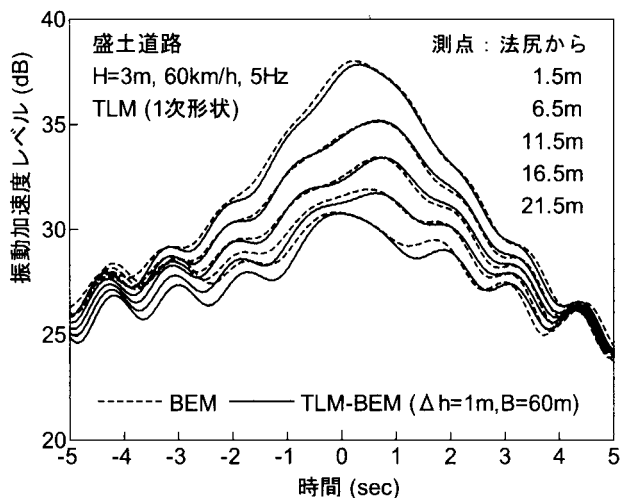


図-4 地盤の深さがユニットパターンに及ぼす影響 (盛土道路, 5Hz)

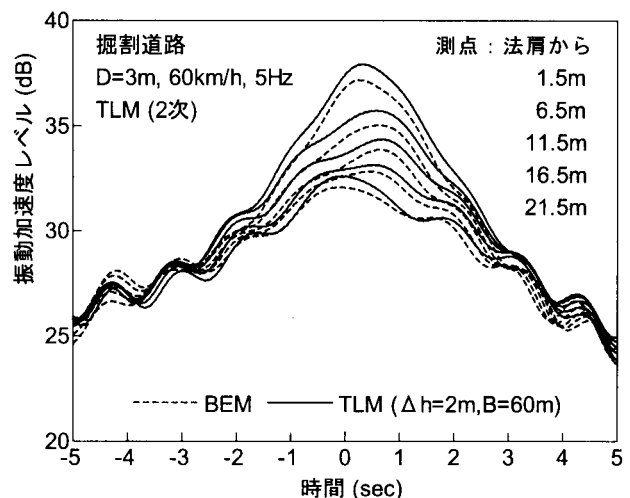


図-5 地盤の深さがユニットパターンに及ぼす影響 (掘割道路: 5Hz)

ものである。

周波数スペクトルを作成する際には、薄層厚と最下端境界までの深さは振動数に関わらず一定とすることが多い。しかし、薄層厚は走行振動荷重の最大振動数（最小波長）に、最下端境界の深さは最小振動数（最大波長）に依存するため、荷重の振動数に関わらず一定とすることは計算時間の無駄である。このことを踏まえて、走行振動荷重の振動数に応じて薄層厚、最下端境界の深さを可変とする計算方法に変更する。

上記1)～3)の検討結果を反映させた計算方法により、前報のBEMでは筆者の使用したパソコンで約62分掛った計算時間が、盛土道路では1分(5Hz)～3分(20Hz)、掘割道路では3分(5Hz)～11分(20Hz)まで短縮できた。なお、BEM計算では、盛土道路、掘割道路は同一のメッシュ数のため、計算時間は同一である。

4. 単一振動数の走行振動荷重による地盤振動のユニットパターン

盛土道路、掘割道路について、走行振動荷重の振動数および走行路からの離隔距離を変化させ、前報のBEM解析結果と比較して本報の計算方法の精度を調べた。図-6～図-8は盛土道路に対する結果、図-9～図-11は掘割道路に対する結果である。薄層厚(Δh)および最下端境界までの深さ(B)は走行振動荷重の振動数に合わせて可変としているが、参考のため図中にこれらの値を記した。なお、20Hzの $B=30m$ は計算上は $B=15m$ であるが、最下端の粘性境界でのエネルギー吸収が十分でない可能性があることを考慮して、地盤の粘性による反射波の距離減衰効果にも期待したものである。

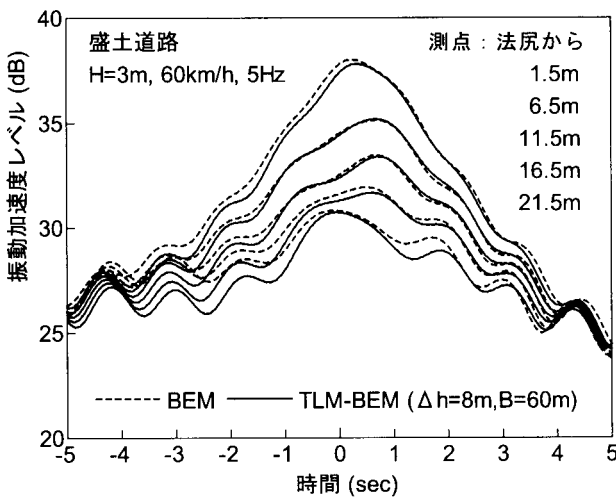


図-6 ユニットパターン（盛土道路：5Hz）

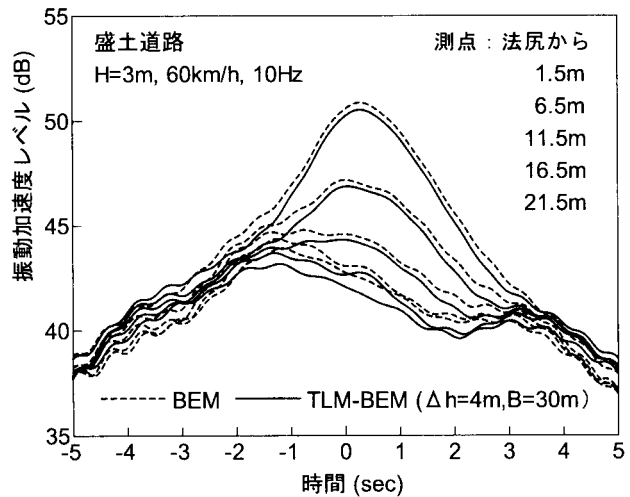


図-7 ユニットパターン（盛土道路：10Hz）

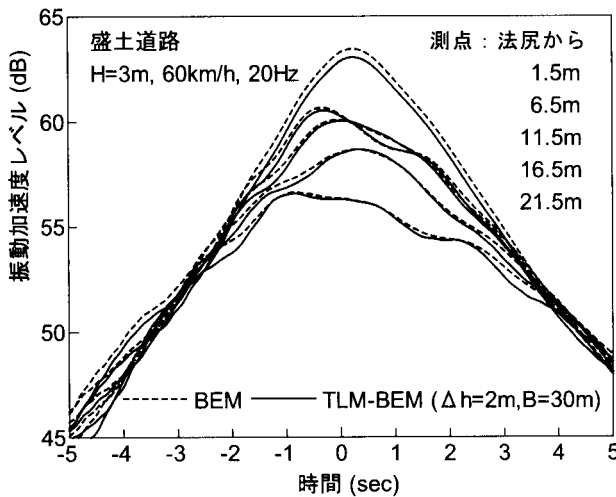


図-8 ユニットパターン（盛土道路：20Hz）

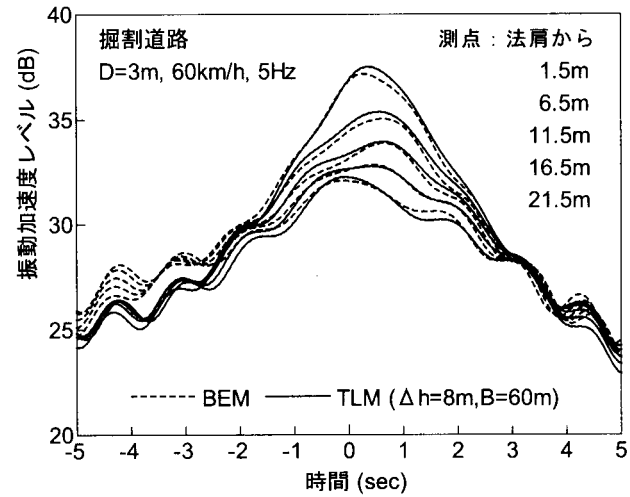


図-9 ユニットパターン（掘割道路：5Hz）

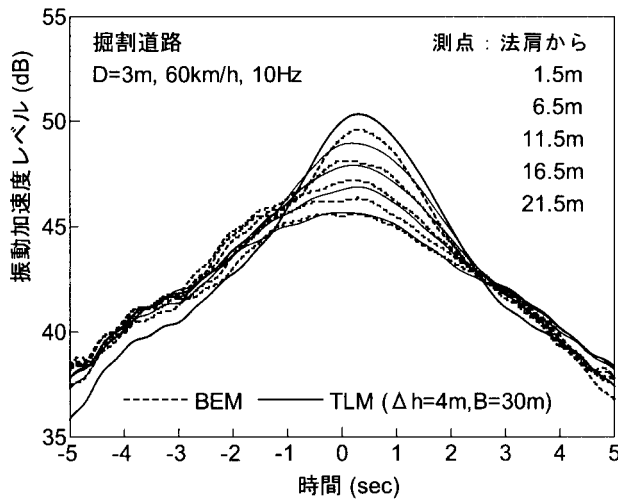


図-10 ユニットパターン（掘割道路：10Hz）

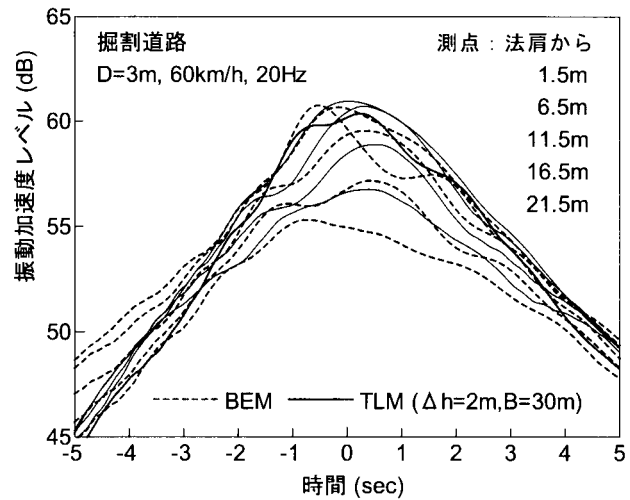


図-11 ユニットパターン（掘割道路：20Hz）

図-6は図-4に対応するものであるが、薄層厚が $\Delta h=8m$ でも問題ないことが分かる。一方、図-9は図-5に対応するが、薄層厚および最下端までの深さを可変にした場合が接近側でやや小さくなっている。斜面部の薄層分割および最下端境界までの深さが同じであることから、原因として掘割部以深の地盤の薄層厚の違いが考えられる。掘割道路ではTLMによる応力解を基本解として用いるため、掘割底面に近い地盤部の薄層分割の粗さが解の精度に影響していることが推測される。しかし、違いが生じている部分の振動加速度レベルは、ピークのレベルに比べて約10dB小さいので、実用上は問題ないと考えられる。

図-11では、TLMによる変位・応力解を基本解とする結果は、前報のBEMによる結果とユニットパターンの形状およびピークの値において違いがやや大きくなっている。この原因を調べる一助として、変位スペクトルを図-12に示すが、約19.2Hz～約20.8Hzの間で、スペクトルの値に違いが見られる。盛土道路の20Hzでは、前報のBEMとハイブリッド法によるユニットパターンに差異はなく、もちろん変位スペクトルはほぼ同じである。掘割道路では、最下端境界までの深さは十分に取っているため、掘割の斜面部や底面に近い地盤部の薄層厚を小さくする必要が考えられるが、いずれも計算時間の増大に関わるので、今後十分に検討する必要がある。

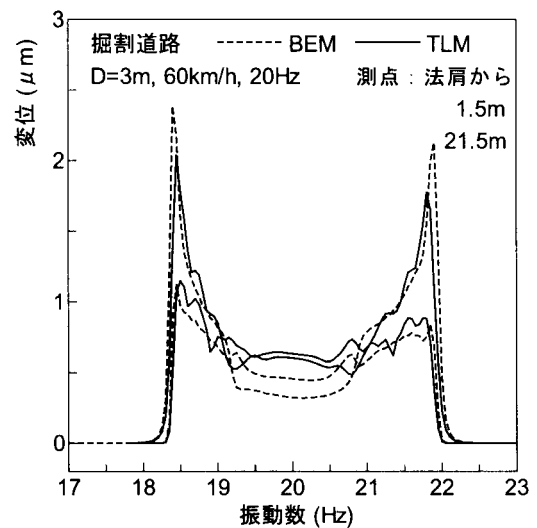


図-12 変位スペクトル（掘割道路 20Hz）

5. 車両走行による盛土道路の地盤振動シミュレーションへの拡張

掘割道路については、計算時間の縮減と計算精度の間に多少の問題が残るため、本報では盛土道路に対して車両走行による地盤振動のシミュレーションを行う。2自由度系にモデル化した車両と路面凹凸との相互作用で生じる動的接地荷重をフーリエ級数展開し、各振動数成分の振動荷重を走行させて解を合成する手法⁸⁾をとる。なお、動的接地荷重の計算では路面を剛として車両と路面凹凸の相互作用のみを考える。また、伝搬する波長から考えて、舗装の存在が地盤振動に大きな影響を与えないことから、舗装を無視する。さらに、路面凹凸の作成には、図-13に示すISOのパワースペクトル¹¹⁾を用いる。これは古い規格案であるが、本報の計算に本質的な影響を与えるものではない。いま、車速を60km/h (16.7 m/s)とし、地盤振動に関係する車両のバネ上振動数2～3Hzとバネ下振動数10～15Hzを考えると、注目すべき路面周波数は0.12～0.18 c/mおよび0.6～0.9 c/mとなる。シミュレーションでは、路面周波数を1.2 c/m程度まで、

すなわち車両モデルと路面凹凸の相互作用による動的接地荷重の計算には 20 Hz までを考える。

路面凹凸のパワースペクトルに、車両モデルの接地荷重の周波数応答関数を掛ければ、動的接地荷重のパワースペクトルが次式のように表される。

$$S_Q(p) = |H_Q(p)|^2 S_R(p) \quad (15)$$

ここに、 p は円振動数、 $S_R(p)$ 、 $S_Q(p)$ は路面凹凸および動的接地荷重のパワースペクトル、 $H_Q(p)$ は動的接地荷重の周波数応答関数である。式(15)の $S_R(p)$ に ISO のパワースペクトル (図-13) を代入し、動的接地荷重のパワースペクトルから時系列を発生させ、この時系列をフーリエ級数に展開する方法を採用すれば、次式が得られる。

$$Q(t) = \sum_{j=-M}^M \sqrt{S_Q(\bar{p}_j) \Delta p_j} e^{i\varphi_j} e^{i\bar{p}_j t} \quad (16)$$

ここに、 \bar{p}_j は有限な振動数領域 ($0 \sim p_M$) を M 個の区間に分割したときの j 番目区間の中央値である。また、 φ_j は位相であるが、路面凹凸のパワースペクトル $S_R(p)$ には位相情報が含まれていないため、 $0 \sim 2\pi$ 間の一様乱数を利用する。これより、円振動数が \bar{p}_j で、荷重振幅が $\sqrt{S_Q(\bar{p}_j) \Delta p_j} e^{i\varphi_j}$ の走行振動荷重に対して式(13)の変位を計算し、加速度を求め振動加速度レベルに換算すれば、ユニットパターンを得ることができる。

ここで、計算時間の縮減のため、式(16)で分解した各振動数成分の走行振動荷重に対する計算を間引きすることを考える。ランダム振動荷重では、各振動数成分の走行振動荷重に対する地盤振動の加速度の時系列を重ね合わせるようになるが、その際時間ステップごとに 3 次スプライン補間を利用して所要の振動数間隔の加速度時系列を作成する。平面道路に対して、補間の影響を調べた結果を図-14 に示す。理論解を用いる平面道路のシミュレーションでは、先の述べた各種の計算時間短縮を考えなくても計算時間は掛らない。したがって、加速度時系列の間引きの影響を調べるには都合が良いという観点から取り上げた。図-14 以外に、間引き個数を 2 個、4 個と変えてみた結果、ピークのレベルは影響を受けないが、接近側および遠ざかる側 (正の時刻側) のレベルの低い所で影響が出ており、個数による影響の度合いが変わっている。本報では、最少の間引き個数の 1 個としたが、接近側に少し影響が出ている。しかし、ピークのレベルに対して小さいので、実用的には問題ないと考える。

ISO の路面状態が良と普通の境の場合について、大型車両走行による地盤振動のシミュレーション結果を図-15 に示す。単一振動数の走行振動荷重によるユニットパターンとはやや異なる様相を呈しており、車両走行による地盤振動のシミュレーションの必要性を示唆している。また、図-16 は、式(16)の荷重振幅における位相に新たな乱数を与えて、図-15 のケースと合わせて 3 種類の路面凹凸 (ただし、 $S_R(\bar{p}_j)$ は同じ) に対する結果を示したものである。同じ程度の路面状態でも発生する地盤振動のレベルには数 dB の差異が生じることが分かる。なお、加速度時系列の重ね合わせにおける間引きまで考慮すれば、筆者が使用したパソコンでの計算時間は約 5 時間であったことを成果として付記しておく。

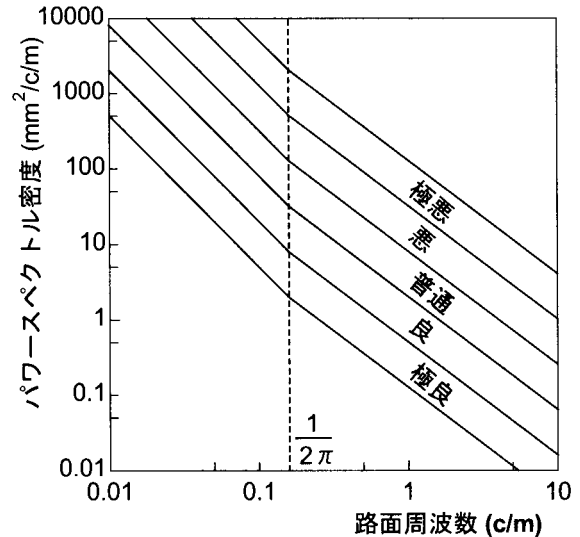


図-13 路面凹凸のパワースペクトル密度 (ISO)

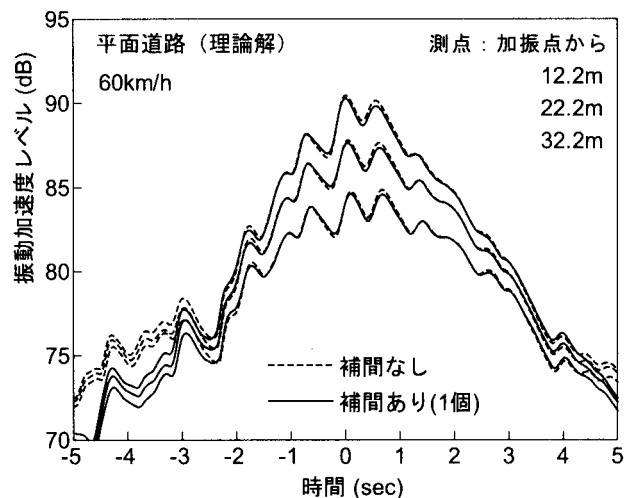


図-14 加速度波形の補間の影響 (平面道路)

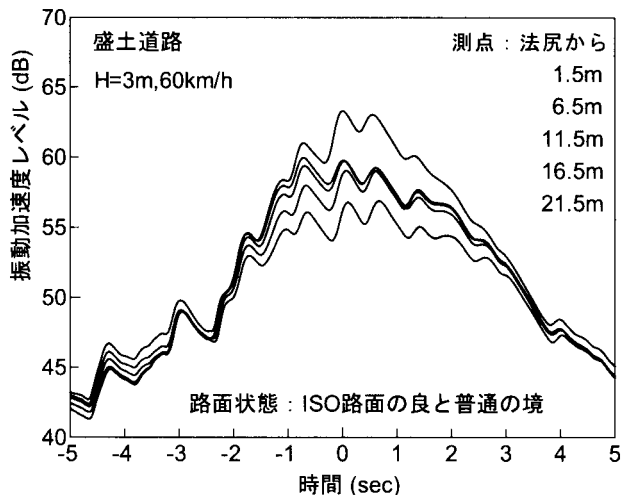


図-15 車両走行によるユニットパターン（盛土道路）

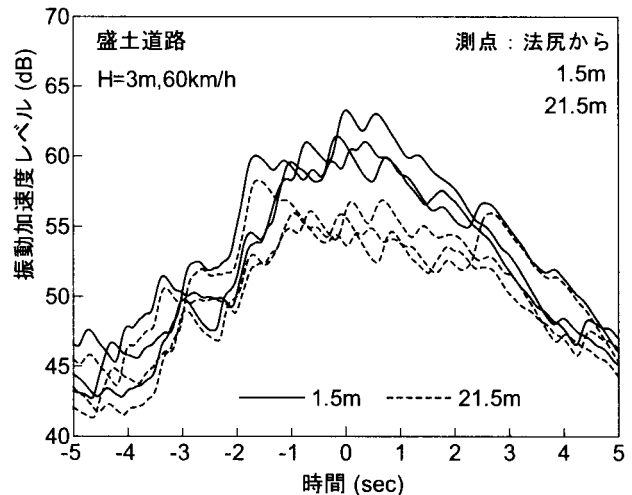


図-16 路面凹凸変動がユニットパターンに及ぼす影響（盛土道路）

6. おわりに

筆者は、平面道路に対して、1台の車両走行による地盤振動のユニットパターンを作成し、道路交通による振動レベル L_{10} のシミュレーション方法を提案した⁹⁾。このシミュレーション法を盛土道路、掘割道路に拡張し、1台の車両走行による沿道の地盤振動のユニットパターンを求め、振動レベル L_{10} を予測する手法の開発を主眼としてきた。単一振動数の走行振動荷重に対するシミュレーションであれば、前報告¹⁰⁾の2.5次元BEM解析で十分であるが、車両走行による盛土道路、掘割道路のシミュレーションでは計算時間の大幅な短縮化が大きな課題であった。盛土道路に対しては、BEMと地表面の応力自由境界を自動的に満足するTLMのハイブリッド法により、また3次スプライン補間による計算回数の縮減などにより、車両走行に対する地盤振動のシミュレーション法として一応の目途をつけた。

一方、掘割道路については、地表面の応力自由境界を自動的に満足するTLMの採用は有効であると考えているが、応力解の精度がネックになることが分かった。現状では走行振動荷重の高い振動数でやや精度が落ちるが、計算時間としては盛土道路の場合の3~4倍になると推定され、筆者が使用したパソコンでも計算できない時間ではないが、実用化のためには更なる計算時間短縮の方法を模索する必要がある。

本研究で得られた計算時間短縮のための有効な方法に対する知見をまとめると以下ようになる。

- 1) ドップラー効果を考慮して、振動数に関するフーリエ逆変換の振動数範囲を狭くする。
- 2) 変位スペクトルの変化が緩やかな振動数範囲に対して、計算する振動数の個数を減らし、3次スプライン補間を利用して所要の振動数間隔のスペクトルを作成する。
- 3) TLMにおいて、薄層厚と最下端境界までの深さを走行振動荷重の振動数に対して可変とする。ただ、掘割道路の場合には、応力解の精度が問題になるため、薄層厚の再考が必要である。
- 4) フーリエ変換した荷重の振動数成分に対する地盤振動の加速度時系列の計算個数を減らし、3次スプライン補間を利用して所要の振動数間隔の加速度時系列を作成し重ね合わせる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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一，構造工学論文集，Vol.39B，pp.95～104，1993.
- 4) 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.
 - 5) 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.605/1-45，pp.143～152，1998.
 - 6) P. Galvin, S. Francois, M. Schevenels, E. Bongini, G. Degrande and G. Lombaert : A 2.5D Coupled FE-BE Model for the Prediction of Railway Induced Vibrations, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, pp.1500～1512, 2010.
 - 7) 斎藤隆泰・上戸研一・廣瀬壯一：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) 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.
 - 9) 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.759/1-67，pp.99～110，2004.
 - 10) 北村泰寿：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，建設工学研究所論文報告集，第54号，pp.149～158，2012.
 - 11) ISO : Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles, Draft international Standard, ISO/DIS 2631, pp.1-17, 1972.

著 者

北村 泰寿 所員（非常勤），工学博士，構造力学，振動工学