

## 盛土・切土道路の地盤振動予測への簡易距離減衰式の適用性に関する 数値シミュレーションによる検討

### Study Using Numerical Simulation on Applicability of Simplified Equation of Attenuation with Distance for Prediction of Traffic Induced Vibration in Banked Road and Cut Road

北村 泰 寿      国 松 直

Yasutoshi Kitamura      Sunao Kunimatsu

#### 1. はじめに

環境アセスメント法に基づく道路事業の環境影響評価では、土木研究所が提案した予測式<sup>1)</sup>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、物理的なモデルに基づいた平面道路の予測式<sup>2)</sup>(RTV-Model:2003)が提案されており、騒音の場合と同じ考え方で、振動加速度レベルのユニットパターン(以下、ユニットパターンと略記)を用いて等価振動加速度レベルが得られる。また、RTV-Model:2003を盛土・切土道路へ拡張した予測法の提案が行われているが<sup>3)</sup>、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。なお、同文献ではRTV-Model:2003と同様に、Bornitz式をベースとした簡易距離減衰式(以下、簡易式と略記)によってユニットパターンを求めている。この予測法の考え方を数理的に調べるため、本報では盛土・切土道路を走行する大型自動車による沿道地盤のユニットパターンを数値シミュレーションによって求め、これと簡易式によるユニットパターンを比較して簡易式の適用性を検討した。

道路交通による沿道の地盤振動のシミュレーションには、調和振動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擬似3次元解析や2.5次元解析と呼ばれる方法が利用できる。調和振動荷重が盛土・切土道路を走行する場合、花里ら<sup>4)</sup>、竹宮ら<sup>5)</sup>の論文に見られるように有限要素法(FEM)と薄層要素法(TLM)のハイブリッド法は有用である。また、Galvinら<sup>6)</sup>は、軌道・盛土構造にFEM、原地盤に多層弾性体の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<sup>7)</sup>は、境界要素法(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。これらの研究では単一振動数の振動荷重、もしくは複数の振動数の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動的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。

このような状況において、前報<sup>8)</sup>では2.5次元BEMにより、盛土・切土道路を単一振動数の振動荷重が走行するときの沿道の地盤振動の評価にユニットパターンを導入し、盛土高さや切土深さ、走行振動荷重の振動数、走行速度の影響について調べた。次いで、前報<sup>9)</sup>では、形状関数を2次関数とするTLMを定式し、盛土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、切土道路に対してはTLMによる変位・応力解を基本解とするBEMを適用し、演算時間の短縮を図る数値計算方法について検討を行った。

本報では、平面道路に対するRTV-Model:2003を盛土・切土道路へ拡張するための知見を得るため、盛土道路では高さ、天端幅、自動車の走行速度、原地盤の物性を変えた6ケース、切土道路では斜面勾配を変えた2ケースについて数値シミュレーションによりユニットパターンを計算した。このユニットパターンへの簡易式によるユニットパターンの適合性を調べて、盛土・切土道路における波動伝搬経路の取り方と幾何減衰、地盤の内部減衰の影響について検討した。

なお、2.5次元 BEM, 2.5次元 TLM の定式の詳細については、紙面の都合上前報 8), 9)に譲る。また、本報は、日本騒音制御学会道路交通振動予測式作成分科会における検討資料として数回に分けて提出したレポート、日本騒音制御学会平成 26 年春季研究発表会講演論文<sup>10)</sup>、Inter-Noise 2014 の論文<sup>11)</sup>などに用いたデータをもとに取りまとめたものである。

## 2. 数値シミュレーションの概要

図-1 に盛土道路と切土道路のシミュレーションモデルを示す。盛土道路では、盛土部には 2.5 次元 BEM, 原地盤には 2.5 次元 TLM のハイブリッド法を用いる。切土道路では 2.5 次元 BEM を使い、計算時間の短縮のため、切土構造は自動車の走行路に対して対称とし、対称性を利用して解析モデルを片側に縮小する。TLM の変位関数には 2 次関数を用い、薄層要素の厚さは加振振動数に対して可変として波長の 1/5 とした。また、有限深さに仮定の境界を設ける必要があり、この境界の深さは加振振動数に対して可変として波長の 1.5 倍とした。BEM の変位関数には 1 次関数を用い、要素長は加振振動数に対して可変として波長の 1/10 を基本とした。地表面を模擬する仮定の有限長の表面境界は加振振動数に対して可変とし、最遠点の測点から 1 波長の距離までとした。

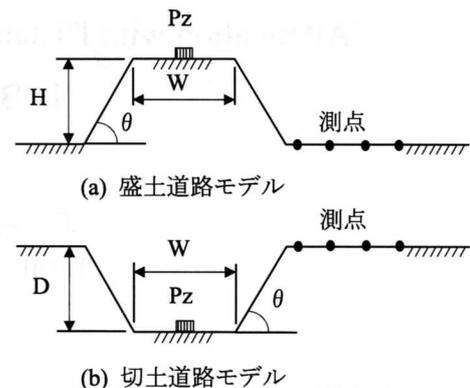


図-1 シミュレーションモデル

図-1 において、 $P_z$  は走行する自動車の鉛直加振力（動的接地荷重）、 $H$  は盛土の高さ、 $D$  は切土の深さ、 $W$  は盛土天端の幅または切土底面の幅、 $\theta$  は法面勾配で、これらの道路構造の諸元を表-1 に与える。測点は法尻または法肩から 1.5m の地点を測点 1 として、5m ピッチで測点 5 (21.5m) までとする。鉛直加振力は BEM の分割長に合わせて 1m 幅の分布荷重とし、道路の中央を走行させる。盛土道路で、原地盤の物性が「同じ」は盛土部と同じ地盤であることを意味し、「異なる」は原地盤にローム地盤を想定している。切土道路で、法面勾配が  $\theta = 90^\circ$  の場合は法面が自立しないが、掘割道路を近似化したものである。

Case 1~5 の盛土道路および Case 7, 8 の切土道路の地盤は、横波の伝搬速度が 200m/s, 密度が  $1.8\text{t/m}^3$ , ポアソン比が 1/3, 減衰定数が 0.02 の材料定数を持つ一様地盤とする。Case 6 では、盛土部は Case 1~5 と同じ材料定数の地盤であるが、原地盤は横波の伝搬速度が 130m/s, 密度が  $1.4\text{t/m}^3$ , ポアソン比が 0.3, 減衰定数が 0.02 の材料定数を持つ地盤とする。

自動車のモデル化については、地盤の鉛直振動に大きな影響を与える後輪の鉛直振動のみを考え、図-2 に示すような 2 自由度振動系にモデル化し、大型自動車の車両諸元を図中の値に仮定する。路面凹凸のパワースペクトル密度を  $S_R(\omega)$ 、接地荷重の周波数伝達関数を  $H_p(\omega)$  と表せば、自動車と路面凹凸の動的相互作用によって生じる接地荷重の

表-1 道路構造の諸元

	Case	高さ(H) 深さ(D)	幅(W)	車速(V)	法面勾配( $\theta$ )	原地盤の物性
盛土道路	1	2 m	11 m	60 km/h	30°	同じ
	2	3 m	11 m	60 km/h	30°	同じ
	3	5 m	11 m	60 km/h	30°	同じ
	4	3 m	21 m	60 km/h	30°	同じ
	5	3 m	11 m	80 km/h	30°	同じ
	6	3 m	11 m	60 km/h	30°	異なる
切土路	7	3 m	11 m	60 km/h	30°	—
	8	3 m	11 m	60 km/h	90°	—

パワースペクトル密度  $S_p(\omega)$  は次式で表わされる。

$$S_p(\omega) = |H_p(\omega)|^2 S_R(\omega) \tag{1}$$

自動車走行路の路面凹凸の作成には、図-3 示す ISO のパワースペクトル<sup>12)</sup>を用いる。このパワースペクトルは古い規格案であるが、本報の論理展開に本質的な影響を与えるものではない。

ところで、図-3 のパワースペクトルには、自動車と路面凹凸の動的相互作用に影響する路面周波数の限界が示されていない。しかし、自動車の振動を発生させる入力源として考えるとき、タイヤの接地長と路面凹凸の波長との関係から路面周波数にはある限界が存在すると仮定する必要がある。既往の文献等を参照すれば、路面周波数の上限は  $2.0c/m$  程度と仮定できる。本報では、図中に示すように極端ではあるが、入力源としての路面凹凸は路面周波数  $2.0c/m$  までとし、それ以上の路面凹凸は無視する。シミュレーションに用いた路面凹凸の程度は、「良」と「普通」の境のスペクトル値とした。また、ISO のパワースペクトルは位相情報を持たないため、路面凹凸を発生させるときには、本報では位相情報に乱数を用いるモンテカルロ・シミュレーションを適用した。

位相情報に乱数を用いたモンテカルロ・シミュレーションの一例として、表-1 の Case 2 について、10 回試行によって得られたユニットパターンを図-4 に示す。この図から、路面凹凸のパワースペクトルが同じであっても、地盤振動には同図に示すような変動が生じるということが分かる。モンテカルロ・シミュレーションでは非常に多くの試行回数を必要とするが、本報では 10 回試行と 100 回試行でどのような変化があるかを調べておく。Case 2 について、10 回試行と 100 回試行の結果に対するパワー平均のユニットパターンの比較を図-5 に示す。10 回と 100 回によるパワー平均のユニットパターンの差異は小さく、試行回数が増えるとユニットパターンは滑らかな曲線形状を呈するようになっていくことが分かる。この結果を踏まえ、本報では表-1 の全ケースに対して、後述の簡易式によるユニットパターンとの比較には 100 回試行による結果のパワー平均のユニットパターンを用いる。

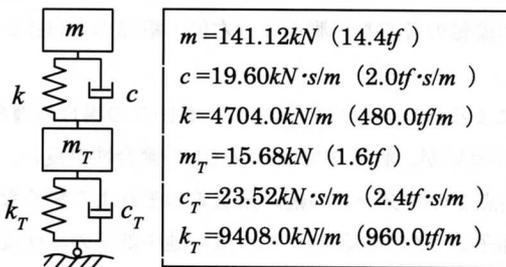


図-2 自動車のモデル化と車両諸元

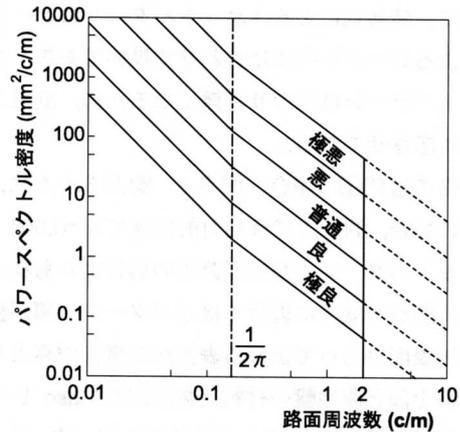


図-3 路面凹凸のパワースペクトル密度

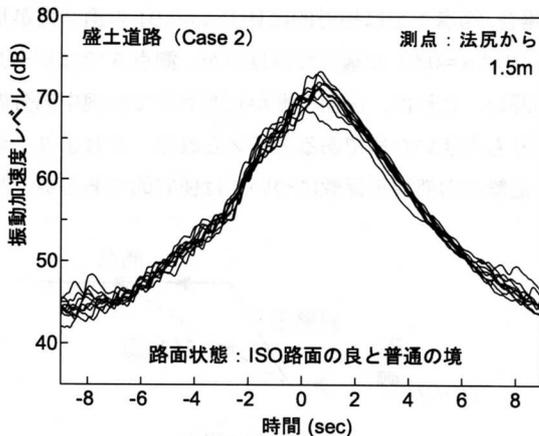


図-4 ユニットパターンのばらつき

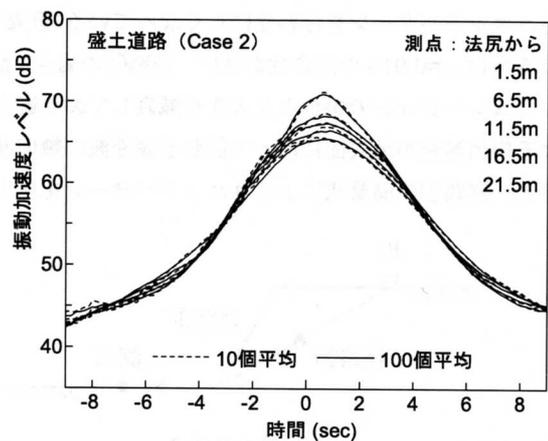


図-5 10 回試行と 100 回試行の比較

### 3. 簡易式の適用における検討事項

地盤の内部減衰を経験的に取り入れた距離減衰式が、Bornitz によって式(2)のように与えられている。Bornitz が与えた式は表面波 ( $n=0.5$ ) であるが、ここでは式(2)のように一般性を持たせた。

$$a = a_0 (r/r_0)^{-n} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (2)$$

ここに、 $a$ 、 $a_0$ は加振源からの距離  $r$ 、 $r_0$ における振動振幅（本報では振動加速度）、 $n$ は波動の幾何減衰を与える定数、 $\alpha$ は地盤の内部減衰係数である。

簡易式によるユニットパターンは、盛土あるいは切土道路上の自動車の走行速度に合わせた加振源の位置と沿道の測点間の距離に対して、式(2)で計算した振動加速度レベルの時間変化として表される。加振源から測点までの距離の取り方として、図-6に示すように2つの経路が考えられる。その一つは、盛土道路、切土道路に関わらず、加振源から地表面に沿って測点に至る経路①である。他の一つは、盛土道路では加振源から盛土部の地中を通過し、法尻から測点まで地表面を伝わる経路②、切土道路では加振源から法面下端まで地表面に沿い、下端から測点まで地中を伝わる経路②である。Bornitz 式の適用を考える場合、経路①に対しては表面波のみの距離減衰式、経路②に対しては、地中を通過する部分の距離減衰に実体波 ( $n=1.0$ ) を適用し、実体波と表面波を組み合わせた距離減衰式とする。簡易式によるユニットパターンの図示に当たっては、経路①の場合は「簡易式：表面」、また盛土道路の経路②に対しては「簡易式：地中→表面」、切土道路の経路②に対しては「簡易式：表面→地中」と表示する。

地盤の内部減衰係数  $\alpha$  は、伝搬する波動の振動数に依存するとされており、対象とする振動源に対して実測によって決めるか、仮定されることが多い。本報では、一意的に  $\alpha$  を決めることはできないことから、盛土道路に対しては表-1の Case 2 を例にとり、また切土道路に対しては Case 7 を例にとり、 $\alpha$  をパラメータとして簡易式によるユニットパターンのシミュレーションによるユニットパターンへの適合性を調べる。図-7は盛土道路、図-8は切土道路に対する結果で、簡易式によるユニットパターンのピークレベルを測点1（法尻、法肩から1.5m点）においてシミュレーションによるピークレベルに合わせて描いてある。なお、両図において、測点1と測点5（法尻、法肩から21.5m点）のユニットパターンは重なり見難くなるため、測点1は左側の縦軸の目盛り、測点5は右側の縦軸の10dBシフトした目盛りに対応させてある。

図-7の経路①の場合、測点1、測点5ともに、簡易式によるユニットパターンは  $\alpha=0.015$  の場合の適合性が良い。経路②の場合、測点1では相対的に見て  $\alpha=0.005$  の適合性が良いが、測点5では  $\alpha=0.01$  の適合性が良い。簡易式によるユニットパターンの幅は経路①の場合よりも狭く、また測点1のパターンの幅が測点5のそれより狭くなっていることから、測点が盛土に近づくほどパターンの幅が狭くなる様子が見られる。これは、地中部分の実体波による幾何減衰が地表面に沿って伝わる表面波の幾何減衰よりも大きいことによると考えられる。これらのことより、盛土道路の場合、盛土部と原地盤の材料定数が同じ Case 1~Case 5 では、経路①の簡易式によるユニットパターンを採用し、地盤の内部減衰係数を  $\alpha=0.015$  にするのがベターな選択である。

図-8の場合、測点1ではシミュレーションによるユニットパターンのピークがいびつな形となっており、簡易式によるユニットパターンを合わせにくくなっている。経路①の場合、測点1では相対的に見て  $\alpha=0.01$  の適合性が良いが、測点5では  $\alpha=0.015$  の適合性が良い。経路②の場合、測点1では  $\alpha=0.01$  の適合性が良いが、測点5ではピークレベルがシミュレーションの場合より大きく減衰しており適合性が悪い。これは、法面下端から測点までの地中部分の実体波による幾何減衰が地表面に沿って伝わる表面波の幾何減衰よりも大きいためであると考えられる。これより、切土道路の場合、経路①の簡易式によるユニットパターンを採用し、地盤の内部減衰係数については便宜的であるが、測点5で

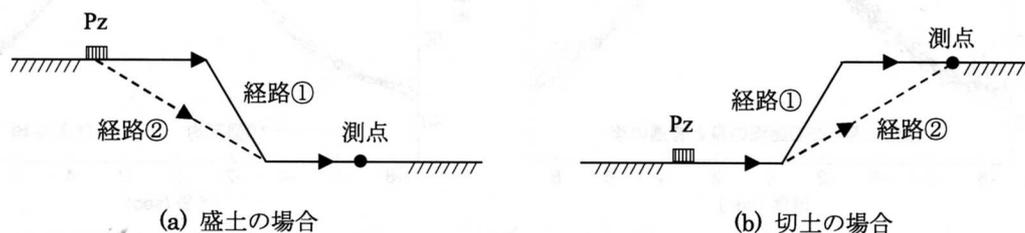


図-6 想定される波動伝搬経路

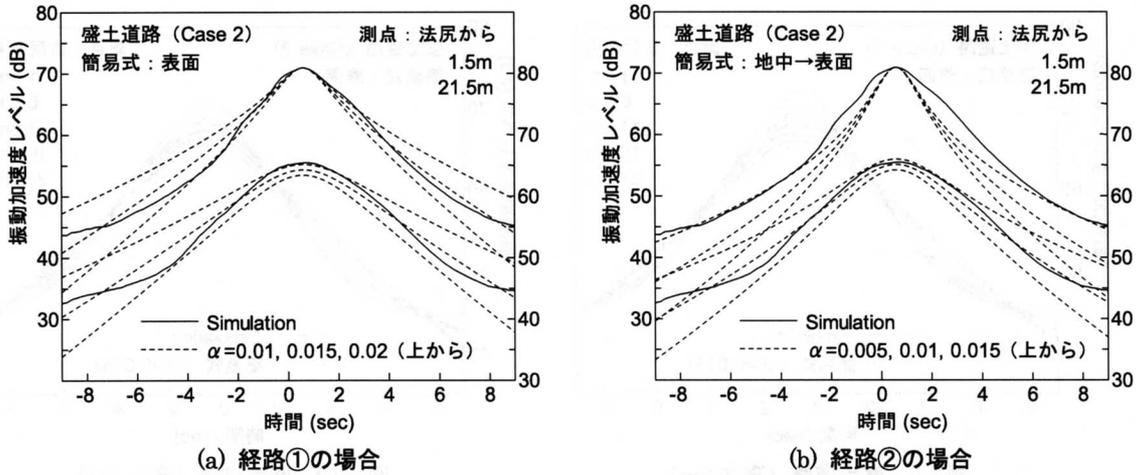


図-7 盛土道路 (Case 2) における地盤の内部減衰係数の検討

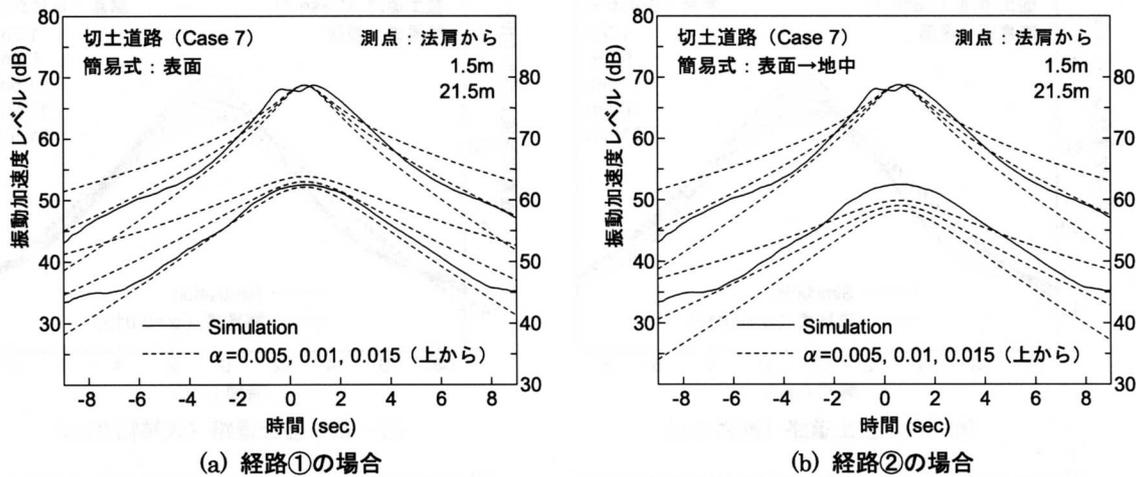


図-8 切土道路 (Case 7) における地盤の内部減衰係数の検討

はシミュレーションによるユニットパターンより少し大きい値 (ユニットパターンの面積) を与えることも考慮して、 $\alpha=0.01$  を選択するのがベターであると考える。

#### 4. 簡易式によるユニットパターンの適用性

盛土道路において、簡易式によるユニットパターンのシミュレーションによるユニットパターンへの適合性を見るため、高さを変えた場合 ( $H=2\text{m}$ ,  $3\text{m}$ ,  $5\text{m}$ ) の結果を図-9~図-11に、天端の幅を広げた場合 ( $W=21\text{m}$ ) の結果を図-12に、車速を上げた場合 ( $V=80\text{km/h}$ ) の結果を図-13に示す。また、切土道路で法面勾配が  $\theta=30^\circ$  の場合の簡易式によるユニットパターンの適合性を調べた結果を図-14に示す。

盛土道路では、シミュレーションによるユニットパターンは自動車の接近側 (負の時間側) の立ち上りの傾斜が遠ざかる側 (正の時間側) の立下りより急になる様子を示しており、簡易式によるユニットパターンは接近側のレベルの低いところでシミュレーションによるユニットパターンと離れている。また、測点が盛土から離れるとともに、簡易式によるピークレベルはシミュレーションによるピークレベルより低くなる傾向にあるが、簡易式によるユニットパターンの適合性はほぼ良好と言える。図-12の盛土の天端幅を広げた Case 4 では、測点 2 (法尻から  $6.5\text{m}$ ) と測点 3 (法尻から  $11.5\text{m}$ ) のシミュレーションによるユニットパターンがほとんど重なっている。天端幅以外は同じ条件の図-10の Case 2 では見られない現象のため、盛土の天端幅が影響しているものと考えられる。

切土道路では、シミュレーションによるユニットパターンが盛土道路の場合より変動しているが、簡易式によるユニ

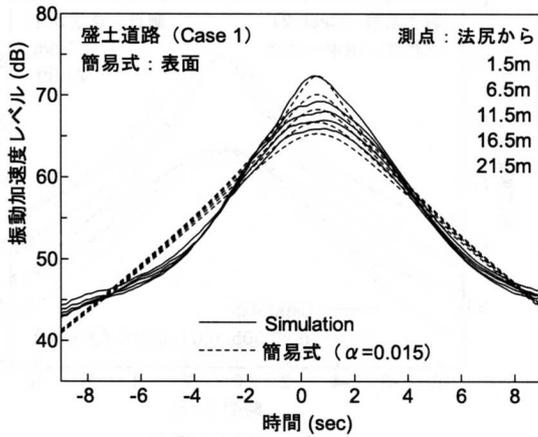


図-9 盛土道路 (高さ 2m)

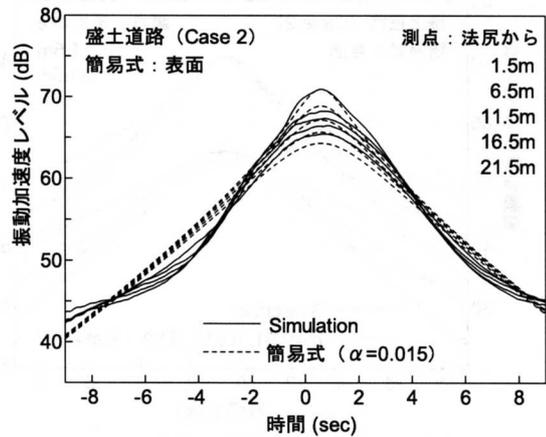


図-10 盛土道路 (高さ 3m)

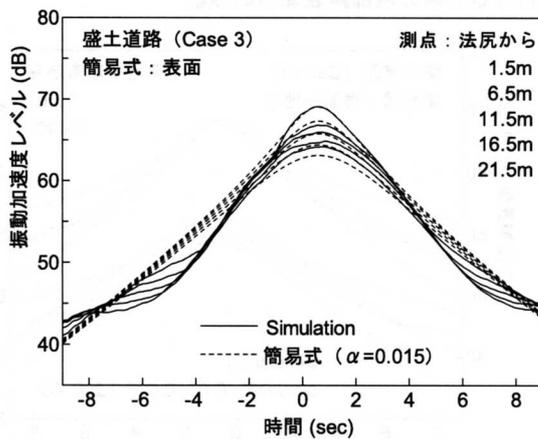


図-11 盛土道路 (高さ 5m)

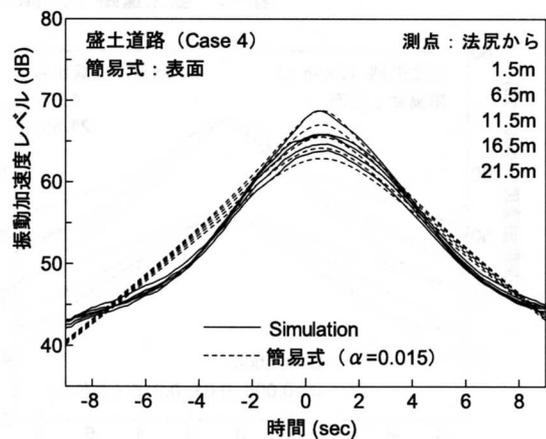


図-12 盛土道路 (天端幅 21m)

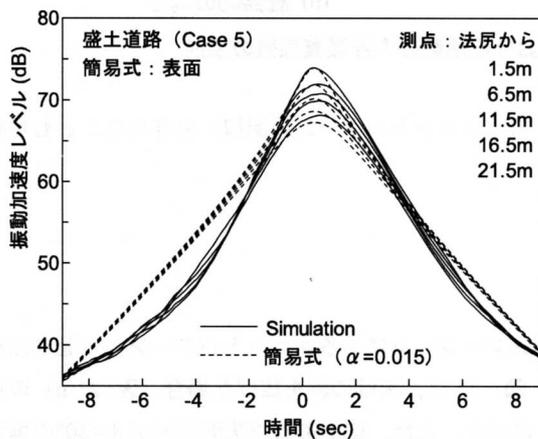


図-13 盛土道路 (車速 80km/h)

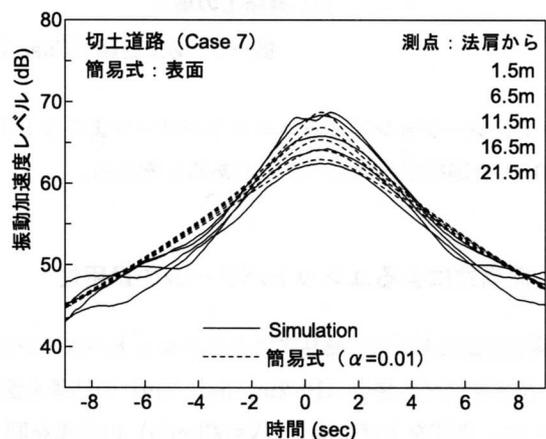


図-14 切土道路 (法面勾配 30°)

ットパターンの適合性は概ね良いと言える。なお、シミュレーションによるユニットパターンでは、測点 1 (法肩から 1.5m) と測点 2 (法肩から 6.5m) のユニットパターンがほぼ重なっている。また、測点 1 のユニットパターンのピークがいびつな形となっているが、これらは測点 1 が法肩に近く、角の影響を受けているものと考えられる。

平面道路や切土道路では、地盤を一様な物性を持つ地盤にモデル化することは、Bornitz 式に基づく簡易式の適用を考える場合、有意な近似化であると考えられる。一方、盛土道路の場合、原地盤の上に盛土を構築することになるため、原地盤と盛土部の物性が異なることは十分にあり得ることである。そこで、原地盤をローム地盤として、盛土部と原地盤の物性が異なるときの簡易式によるユニットパターンの適合性を調べたものが図-15、図-16 である。図-15 は、盛土部の内部減衰係数は先に計算したケースと同じとし、原地盤の減衰係数を変えた場合の結果である。原地盤の減衰

係数を大きくすると簡易式によるユニットパターンはシミュレーションによるユニットパターンに少し近付くが、ピークレベルの距離減衰特性が悪くなる。これより、原地盤の減衰係数を操作しても簡易式によるユニットパターンの良好な適合性が得られる可能性は低い。そこで、盛土部と原地盤の減衰係数を同じにした場合、図-16の $\alpha=0.03$ のケースに見られるように、簡易式によるユニットパターンのピークレベルの距離減衰特性は改善されていないが、形状はかなり良い適合性を示している。

半無限弾性体において、レイリー波のエネルギーの大部分は表面から1波長以内の深さを通することは周知のことである<sup>13)</sup>。いま、伝搬する波動の主要振動数を10Hz~20Hzと考えると、盛土部と同じ物性の半無限弾性体におけるレイリー波の波長は9.3m~18.7m、ローム地盤の場合のレイリー波の波長は6.0m~12.1mとなる。盛土道路でも半無限弾性体と同様の考え方ができるとすれば、盛土の高さが3mであるから、表面波のエネルギーのかなりの部分が原地盤を通過している可能性がある。したがって、図-16のように盛土部と原地盤の内部減衰係数を同じとすることは十分妥当性があると考えられる。もしこの考え方を妥当とするなら、今後盛土高さを高くすることによって、盛土部の内部減衰係数( $\alpha=0.015$ )の影響が出てくることを確認する必要がある。

掘削道路を模擬した法面勾配が $\theta=90^\circ$ の切土道路に対して、簡易式によるユニットパターンの適合性を調べた結果を図-17に示す。シミュレーションによるユニットパターンがやや複雑な形状になっており、簡易式によるユニットパターンを合わせにくい状態であるが、経路②を選択する方が適合性は良いと言える。法面勾配が $\theta=30^\circ$ の場合には経路①の方の適合性が良かったが、この場合は法面が垂直になっているため、地表面に沿って表面波が伝わるとすることには無理があるかも知れない。なお、シミュレーションによるユニットパターンでは、法面勾配が $\theta=30^\circ$ の場合と違って、

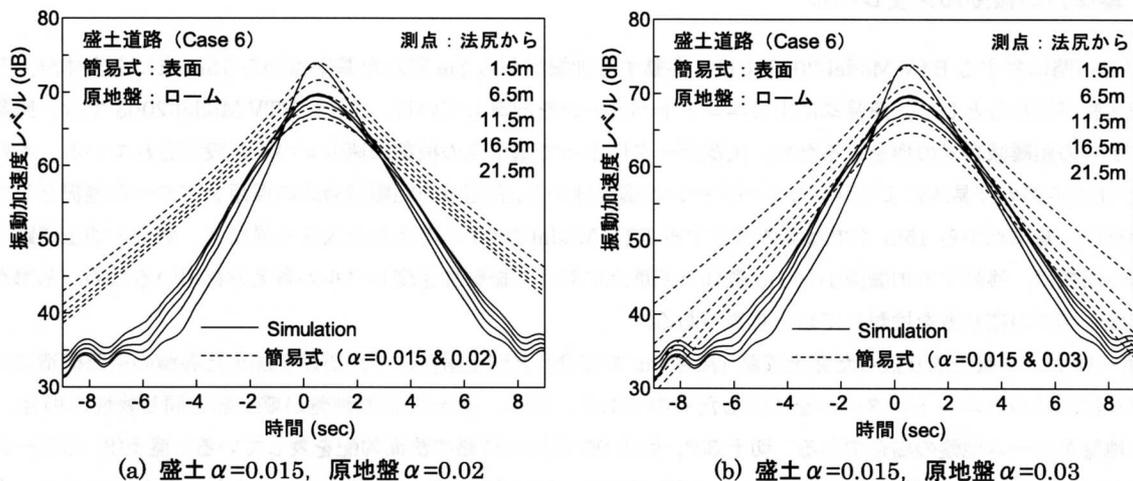


図-15 盛土道路で盛土と原地盤の内部減衰係数が異なる場合 (経路①)

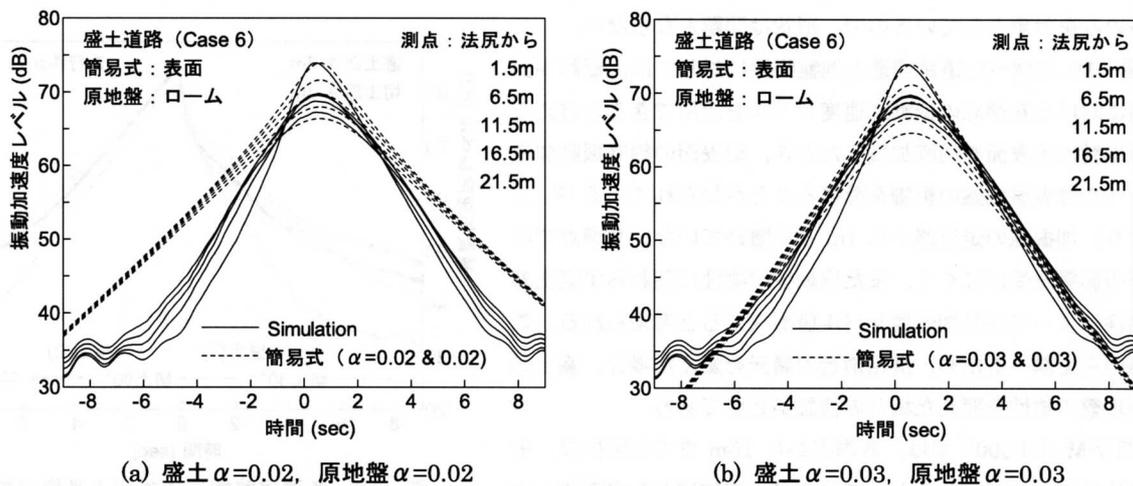


図-16 盛土道路で盛土と原地盤の内部減衰係数が同じ場合 (経路①)

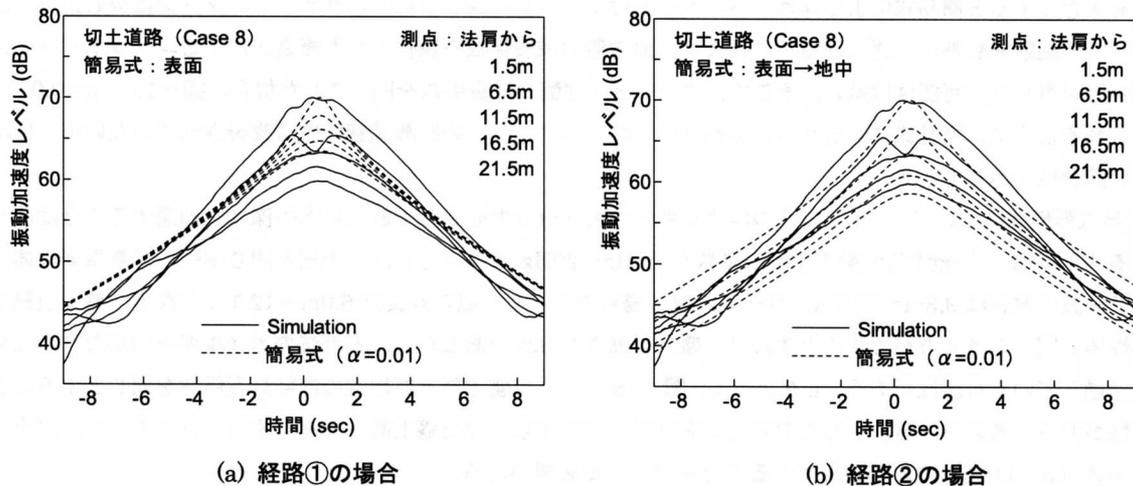


図-17 切土道路で法面勾配が90°の場合（掘割道路の近似モデル）

測点2のユニットパターンのピークがいびつな形となっている。角の影響を受けているものと考えられるが、法肩に近い測点1の方には目立った変状が見られないことから、さらに波動論的な検討が必要である。

## 5. 基準点の振動加速度レベル

平面道路に対するRTV-Model:2003では、移動する加振源から1m離れた基準点から15mまでを実体波、それ以遠は表面波が伝わるとして、簡易式によるユニットパターンを計算している。また、RTV-Model:2003では、簡易式は基準点からの距離減衰式の形をとるため、実測データによって基準点の振動加速度レベルが設定されている。本報では、盛土・切土道路の簡易式によるユニットパターンの適合性から、表面波の距離減衰式の採用をベターな選択としている。この点が、基準点から15mまでは実体波とするRTV-Model:2003の考え方と大きく異なる。盛土・切土道路でも平面道路と同様に、移動する加振源から1m離れた基準点における振動加速度レベルの考え方をを用いるため、基準点の振動加速度レベルの在り方を検討しておく必要がある。

図-18は、本報で取り扱った盛土道路（高さ3mの場合）と切土道路に平面道路を加えた各種の道路構造に対して、基準点におけるユニットパターンを比較したものである。図中、盛土(1)は原地盤が盛土部と同じ物性の場合、盛土(2)は原地盤がローム地盤の場合である。切土30°、切土90°は切土道路の法面勾配を表している。盛土(2)のピークレベル値は81.8dBで、他の道路構造のピークレベル値83.8dB~84.1dBより2dB程小さい。また、盛土(2)のユニットパターンの幅が他の道路構造に対するユニットパターンより狭くなっているが、基準点の振動加速度レベルとしてはピークレベルのみを対象としているので、形状は問題とならない。

図-18で調べた道路構造と地盤物性に対しては、概ね平面道路における基準点の振動加速度レベルを流用できると言える。成層地盤の地表面を鉛直加振したとき、地表面の鉛直振動加速度レベルは表層地盤の影響を受けることが知られている<sup>13)</sup>。これより、加振源の走行路から1mしか離れていない基準点では地形の影響を受けにくく、また原地盤の物性に関わらず盛土部の物性によって振動加速度レベル値が決まると考えられる。これらの点を調べるため、道路構造の諸元を変えた場合、盛土部と原地盤の物性を変えた場合の検証が必要である。

RTV-Model:2003では、基準点から15mまでを実体波、それ以遠は表面波が伝わるとしているが、実体波から表面波への変化点は加振振動数に依存することが知られている。図-19は、

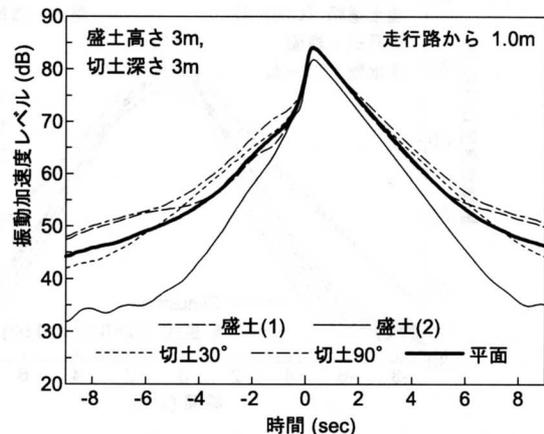


図-18 各種道路構造に対する基準点のユニットパターン

半無限弾性体表面の鉛直点加振による表面の鉛直振動加速度レベルの距離減衰を調べたものである。図中、厳密解は、無限積分に対して積分変数が無限大での被積分関数の近似項を差し引く処理を施して数値積分した解である。表面波は、厳密解から留数項を取り出した解である。実体波は、振源距離 1m において、厳密解の振動加速度レベル値となるように補正した距離に逆比例する曲線（幾何減衰  $n=1.0$  に相当）である。

盛土部と同じような硬い地盤（(a)図）でも、加振振動数が 5Hz 程度以下にならないければ、実体波から表面波へ変わる距離は 15m とはならない。自動車走行の場合のように広い範囲の周波数成分を持つ場合、実体波から表面波への変化点を特定することは難しい。しかし、移動する加振源から 1m 離れた基準点から表面波の距離減衰式を適用すれば、図-19 から分かるように表面波の距離減衰曲線（破線）は上方に移動し、過大な振動値を与える。一方、15m 地点を実体波から表面波への変化点とすると、表面波の距離減衰曲線は下方に移動し、過小な振動値を与えることになる。本報での結果に基づけば、基準点（1m 地点）から表面波の距離減衰式を用いることがベターな判断であることから、現行の基準点の振動加速度レベルを補正する方法を検討する必要があると考えられる。

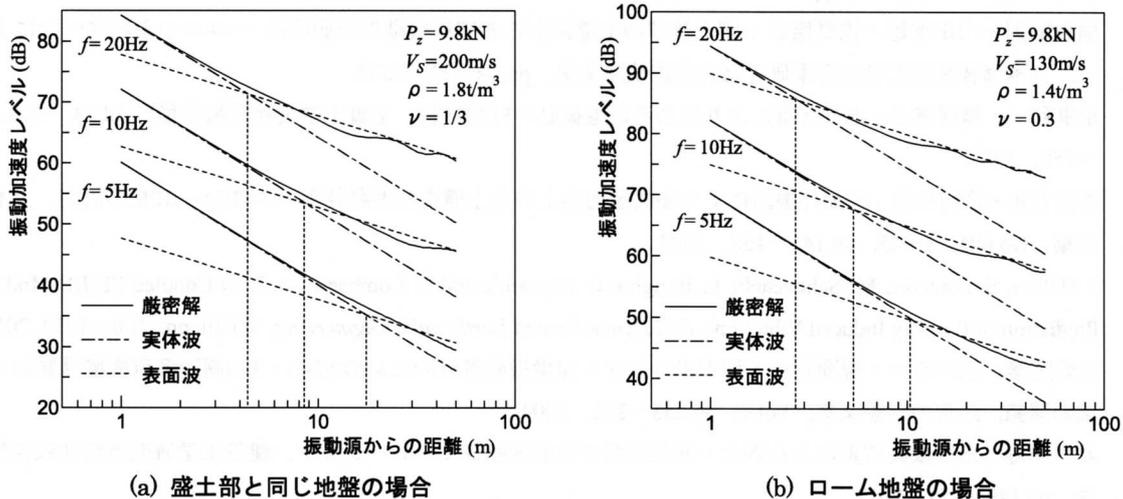


図-19 半無限弾性体表面の鉛直点加振による表面の鉛直振動加速度レベルの距離減衰

## 6. おわりに

盛土・切土道路に対して、簡易距離減衰式によるユニットパターンの適用を図るため、シミュレーションによるユニットパターンへの適合性を調べた。実際の盛土・切土道路の道路構造を単純化したシミュレーションモデルで、用いた地盤の材料定数も限られたものであるが、得られた知見をまとめると以下のようになる。

- 1) 盛土道路で盛土部と原地盤の物性が同じ場合、地表面に沿って伝搬する表面波の距離減衰式によるユニットパターンを採用し、地盤の内部減衰係数を  $\alpha=0.015$  にするのが比較的適合性が良い。
- 2) 法面勾配 30°の切土道路では、地表面に沿って伝搬する表面波の距離減衰式によるユニットパターンを採用し、地盤の内部減衰係数を  $\alpha=0.01$  にするのが比較的適合性が良い。
- 3) 盛土道路の構造諸元や自動車の速度を変えた場合においても、地表面に沿って伝搬する表面波の距離減衰式によるユニットパターンの適用性はほぼ良好である。
- 4) 盛土道路の盛土部と原地盤の物性が異なる場合、盛土部と原地盤の内部減衰係数を同じにすれば、地表面に沿って伝搬する表面波の距離減衰式によるユニットパターンの形状は概ね良い適合性を示す。
- 5) 掘割道路を模擬した法面勾配 90°の切土道路では、法面下端まで表面波、法面下端から地中を実体波で伝搬する距離減衰式によるユニットパターンの適合性が概ね良い。
- 6) 道路構造や原地盤の物性に関わらず、基準点の振動加速度レベルとして平面道路における基準点の振動加速度レベルを流用できる。
- 7) 基準点である 1m 地点から表面波の距離減衰式を用いるためには、現行の基準点の振動加速度レベルを補正する方

法を検討する必要がある。

## 謝 辞

本報で論述した内容の一部は日本騒音制御工学会道路交通振動予測式作成分科会に検討資料として提出し、分科会メンバーから貴重な意見を頂いた。ここに、分科会メンバー各位に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば, 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.
- 2) 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/J RTV-MODEL:2003), 騒音制御, Vo.28, No.3, pp.207~216, 2004.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 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/I-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・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) 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.
- 9) 北村泰寿: 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, 建設工学研究所論文報告集, 第55号, pp.1~10, 2013.
- 10) 北村泰寿・国松 直: 盛土道路沿道の交通振動予測への簡易距離減衰式の適用性に関する数値シミュレーションによる検討, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp.101~104, 2014.
- 11) S. Kunimatsu and Y. Kitamura, et al. : Research Activities on INCE/J RTV (Road Traffic Vibration)-Model - Part: 2 Prediction of ground-borne vibration induced by traffic from cutting- and banking-structure roads -, *Proc. of Inter-Noise 2014*, Melbourne, Australia, 2014. (投稿中)
- 12) ISO : Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles, Draft international Standard, ISO/DIS 2631, pp.1~17, 1972.
- 13) 日本騒音制御工学会編: 騒音制御工学ハンドブック 基礎編・応用編, 技報堂出版, pp.326~330, 2001.

## 著 者

北村 泰寿 所員 (非常勤), 工学博士, 構造力学, 振動工学  
 国松 直 (独)産業技術総合研究所, 工学博士, 振動工学