

【建設工学研究所論文報告集 61 号 [報告] 2019 年 11 月】

平面道路における地盤振動のユニットパターン計算に用いる 簡易距離減衰式の数値シミュレーションによる検証

Verification by Numerical Simulation on Simplified Equation of Attenuation with Distance to Calculate Unit Pattern of Ground Vibration in Flat Road

北村 泰 寿 国 松 直
Yasutoshi Kitamura Sunao Kunimatsu

1. はじめに

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道路交通振動予測法 INCE/J RTV-MODEL 2003 (RTV-2003 と略記) が提案されている¹⁾。RTV-2003 が公表されてから多年が過ぎ、盛土・切土道路の予測法も確立されていない現状を踏まえて、筆者らは平面・盛土・切土道路に対する予測法を物理数学的に検討してきた^{2)~8)}。これらの検討から、盛土・切土道路に対する予測法は平面道路に対する予測法の延長線上にあると見なされるが、盛土・切土道路に対する予測法の確立には大きく二つの視点からの検討が必要であることが分かった。

第 1 の視点は、平面道路に対する RTV-2003 を盛土・切土道路へ拡張して適用することに問題がないか確認することである。本来、RTV-2003 で用いられている地盤振動の距離減衰式は、半無限地盤に対する経験式である Bornitz 式をベースにしている。平面ではない盛土・切土道路の形状等が Bornitz 式の適用に限界を与えることは想像に難くない。このため、まず高さ 5m 以下の低盛土道路・深さ 5m 以下の低切土道路を対象として、数値シミュレーションにより RTV-2003 の距離減衰式の適用を検討した。その結果については、本報とは別に公表予定である。

第 2 の視点は、盛土・切土道路への RTV-2003 の距離減衰式の拡張を検討する過程において、RTV-2003 の距離減衰式の諸因子は実測によって決められているため、物理数学的には曖昧さが残ることが分かった。したがって、道路交通振動の予測法の精度を上げるためには、RTV-2003 の距離減衰式の諸因子に対する物理数学的な見直しが必要であるとの見解に至った。そこで、本報は舗装と地盤の動的相互作用に注目して、この動的相互作用と距離減衰式の諸因子との関連性を数値シミュレーションによって調べたものである。

数値シミュレーションには、3 次元波動場で走行振動荷重に対する計算ができる 2.5 次元解析 (2.5D 解析と略) を適用する。2.5D 解析は、3 次元波動場を加振源の走行方向に離散化波数法を適用して道路横断面の 2 次元波動場に縮小するが、変位・力は 3 次元成分で表される数値シミュレーションである。なお、本報では 2.5D 解析には 2.5 次元境界要素法 (BEM) を用いる。

2. 数値解析モデルと解析手法

道路の舗装構造は、一般的に表層、基層、上層路盤、下層路盤、路床・地盤の構成になっている。この舗装構造をモデル化して 2.5D 解析を行う場合、全層をモデル化すると演算時間が掛る上に、薄い層にモデル化すると正確な数値解が得られないという解析手法上の問題が生じる。また、下層路盤、路床と地盤の S 波速度の値は近く、表層、基層、上層路盤の S 波速度の値よりかなり小さい。このため、舗装構造のモデル化は上層路盤と下層路盤の境で分け、図-1 に示すような表層、基層、上層路盤を一体化した舗装部と下層路盤、路床・地盤を一体化した地盤部の板状舗装-地盤系へのモデル化が妥当であると考えた。舗装幅 (W) は 2 車線程度を想定して W=11m とし、考察の便宜上解析モデルを

対称とするため加振源は舗装の中央を走行させた。

表-1に板状舗装の力学定数と3種類の地盤(A地盤, B地盤, C地盤)に対する力学定数を示す。舗装の力学定数は、設計例等を参照して表層, 基層, 上層路盤の平均的な値として仮定したものである。地盤については、A地盤の力学定数は著者らが従来から数値シミュレーションに用いている値で、例えば文献2)~4)で用いられている。B地盤, C地盤の力学定数については、各種の資料等からB地盤はローム地盤, C地盤は砂礫地盤を想定して仮定した値であるが、それぞれの地盤を代表する値ではないことを断っておく。

舗装の等値換算厚 T_A は設計 CBR と交通量から決まるが、ここでは設計 CBR を決める方法が無い。そこで、A地盤とC地盤では設計 CBR を6~8, B地盤では設計 CBR を3程度と仮定し、交通量をC交通とすれば、A地盤とC地盤では $T_A=26\text{cm} \sim 28\text{cm}$, B地盤では $T_A=35\text{cm}$ 程度となる。一方、下層路盤の等値換算厚は、設計例等を参照して7cm~10cm程度と考えられる。したがって、これらの値をそれぞれの地盤の等値換算厚 T_A から引いてやると、表層, 基層, 上層路盤を合計した等値換算厚は、A地盤とC地盤では16cm~21cm, B地盤では25cm~28cmとなる。これらを踏まえて、板状舗装の層厚(h)は表-1のように、A地盤とC地盤で $h=18\text{cm}$, B地盤で $h=25\text{cm}$ と仮定した⁸⁾。

大型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、2自由度振動系にモデル化した。過去の文献等を参照して、車両総重量が20tfの諸元を仮定したが、cgs単位系からSI単位系に換算して示すと、ばね上の質量, 減衰係数, ばね定数が1,469 kg, 20 kN・s/m, 4,704 kN/m, ばね下の質量, 減衰係数, ばね定数が163 kg, 23.5 kN・s/m, 9,408 kN/mである。

自動車が走行する路面の凹凸の作成には、図-2の破線で示すISOのパワースペクトル⁹⁾を用いた。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、こ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、自動車に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、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した。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(図中太破線)。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。これらの条件の下で発生させた路面凹凸のパワースペクトルの一例を同図中に示したが、路面周波数2.0c/mでパワースペクトルの値は急減していることが分かる。

本報で利用する2.5次元境界要素法の基本解等の詳細は紙面の都合上文献2)に譲るが、ここでは解析手法を簡単に紹介しておく。まず、場の支配方程式と境界条件に対して、加振源の走行方向である空間x軸に関するフーリエ変換、時間tに関するフーリエ級数展開を行う。空間x軸に対応する波数 k_x 空間、時間tに対応する周波数 ω_n 空間における支配方程式と境界条件に変換すれば、実空間y, zに関する支配方程式と境界条件になる。実空間y, zに関する支配方程式と境界条件に積分定理を適用すれば、2次元場(y, z)における積分方程式が得られる。積分方程式は2次元場で定式されるが、変位, 応力は3次元場と同じ成分を持つため、2.5次元(擬似3次元)と呼ばれる。この積分方程式に対する基本解として、2.5次元全無限基本解を用いる²⁾。積分方程式の解は $e^{i\omega_n t}$ の調和関数で、周波数 ω_n ($n = -\infty \sim \infty$)のフーリエ級



図-1 アスファルト舗装の近似モデル

表-1 舗装と地盤の力学定数

	舗装	A地盤	B地盤	C地盤
S波速度 (m/s)	1,100	200	130	200
密度 (kg/m ³)	2,300	1,800	1,400	2,000
ポアソン比	0.35	1/3	0.3	0.35
減衰定数	0.03	0.02	0.02	0.04
舗装厚 (cm)	—	18	25	18

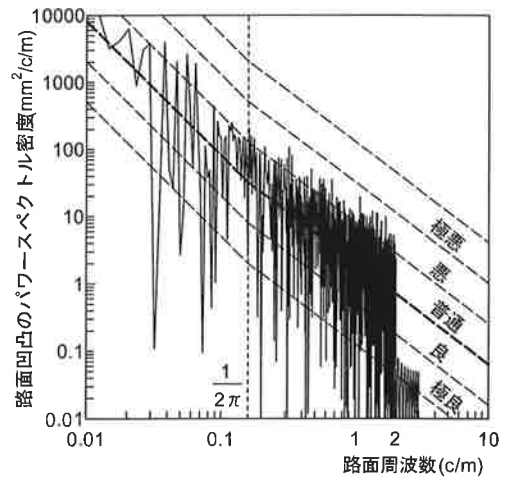


図-2 路面凹凸のパワースペクトル密度

数解となる。離散個数 n に対して有限個の範囲（加振振動数の両サイドに有限個の離散周波数の範囲）の解を重ね合わせれば、所要の解が得られる。

3. 舗装—地盤系の動的挙動

RTV-2003 の距離減衰式は Bornitz 式をベースにした式であるが、RTV-2003 では道路舗装の影響は舗装の等値換算厚 T_A を因子の一つとして、基準点の振動加速度レベルの値を減じているだけである。これは、Bornitz 式の絶対値を決める係数には関わらず、距離減衰特性には影響しないことを意味している。図-3 は、舗装幅が $W=11\text{m}$ （半幅 5.5m ）のとき、走行路から測点までの距離を横軸に走行加振源と測点間の距離に対する舗装部分の割合を示したものである。例えば、測点が 10m 地点の場合、走行加振源と測点間の距離に対する舗装部分の割合は、加振源の位置に関わらず 55% になることを表している。測点が走行路に近付けば、走行加振源から測点への距離減衰に対する舗装部の影響が大きくなり、走行加振源と測点間の距離変化に基づいて描かれるユニットパターンの形が影響を受けることになる。したがって、舗装部の存在がユニットパターンにどのような影響を与えるか、舗装—地盤系の動的挙動の面から実態を把握しておく必要がある。

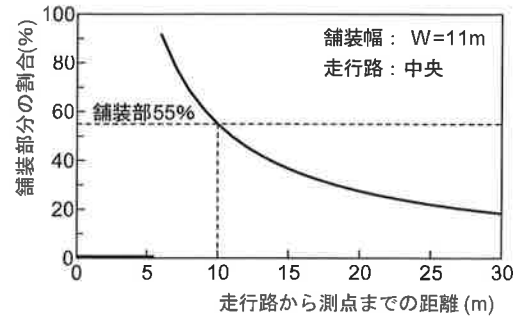


図-3 加振源の移動に伴う舗装部の割合

図-4 は、A 地盤において舗装上の測点と舗装端（ 5.5m ）以遠の地盤上の測点におけるユニットパターンを図示したものである。舗装上のユニットパターンは、加振源が接近する側（負の時間側）では測点の距離に関わらず全く一致しているが、遠ざかる側（正の時間側）では差が生じており、ピークの値は距離に対して単調な減衰を示している。これらの現象は、地盤上の測点におけるユニットパターンの距離に対する変化とは全く異なる特徴と言える。一方、舗装がない場合には地盤はどのような動的挙動を示すか調べるため、図-4 と同じ測点におけるユニットパターンを図示したものが図-5 である。5m までの測点では、舗装有りの場合と同様に負の時間側のユニットパターンは一致しており、正の時間側では差が生じている。6m 以遠の測点では、図-4 の場合のようなユニットパターンの変動はなく、距離とともにピーク値は減少し、パターンは対称形に近づく様子を示している。

図-4 と図-5 のユニットパターンの時間に対する変化を別の角度から見るため、時間ごとにユニットパターンの測線上の距離に対する変化を図示したものが図-6 と図-7 である。図-6 の負の時間（ $-3\text{s} \sim -1\text{s}$ ）では、舗装部の振動

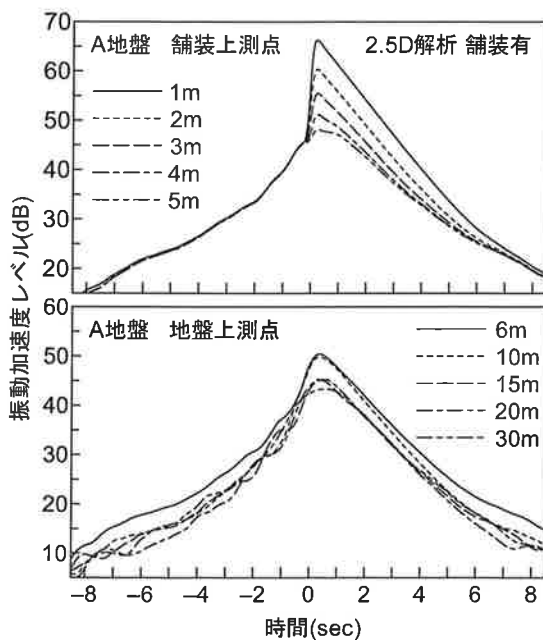


図-4 ユニットパターン（A 地盤，舗装有）

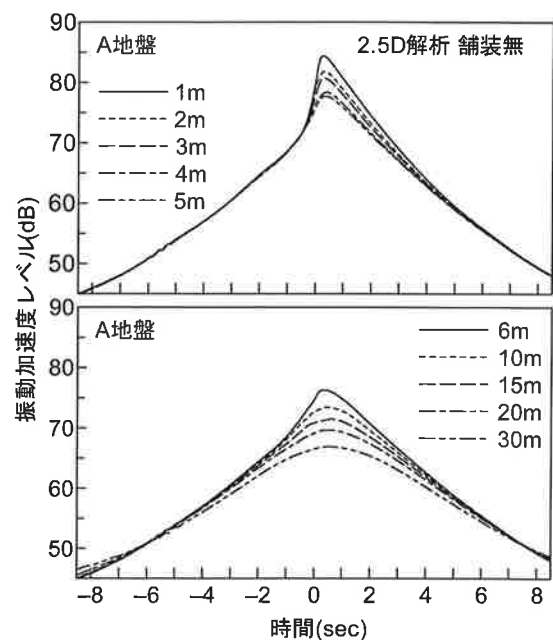


図-5 ユニットパターン（A 地盤，舗装無）

加速度レベルは一樣な値となっている。位相情報がないため舗装の変形が一樣かどうかは厳密には判断できないが、一樣に近い状態ではないかと推測する。一方、同図の 0s~3s の時間では、走行路位置でピークを示し舗装端に向けて急減衰する形となっている。さらに、8s 以降では舗装部の振動加速度レベルは一樣になる様子を示している。これに対して、図-7 の -3s~-1s では、走行路からの距離に対する変化はわずかで、6s, 8s でも同様の变化となっている。0s~3s の時間では走行路位置でピークを示し、走行路からの距離に対して減衰を示しているが、図-6 のような急な減衰ではない。総じて、舗装無しの場合は振動加速度レベルの距離に対する変動はほとんど無いが、舗装有りの場合の地盤部では距離に対する変動が生じており、舗装の影響が大きいことを示している。

B 地盤と C 地盤に対するユニットパターンとユニットパターンの時間ごとの距離変化の図は紙面の都合上省略したが、図-4、図-6 と同様の傾向を示しており、舗装-地盤系の動的挙動に対する考察は図-4 と図-6 に対する考察と変わらない。これらの情報から、舗装の有無によってユニットパターンの形に違いが生じることが分かった。これは、舗装の有無によって走行加振源の加振力に違いがあることを意味している。つまり、舗装の変形によって舗装と地盤の接触面に働く接触圧（地盤の加振力）は、舗装無しの場合のように集中的な加振力ではない。したがって、このような加振力を集中加振力に置き換えて Bornitz 式を適用するということに問題はないか、あるいは適用とした場合、加振力の置き換えに伴う誤差は許容されるものか、今後の更なる検討が必要である。

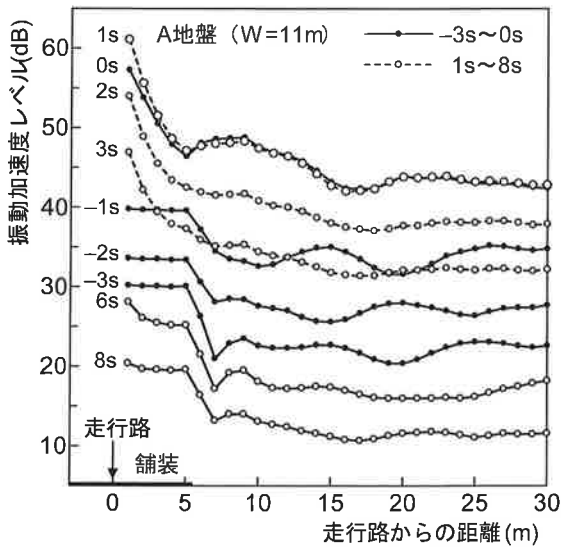


図-6 ユニットパターンの時間ごとの距離変化 (A 地盤, 舗装有)

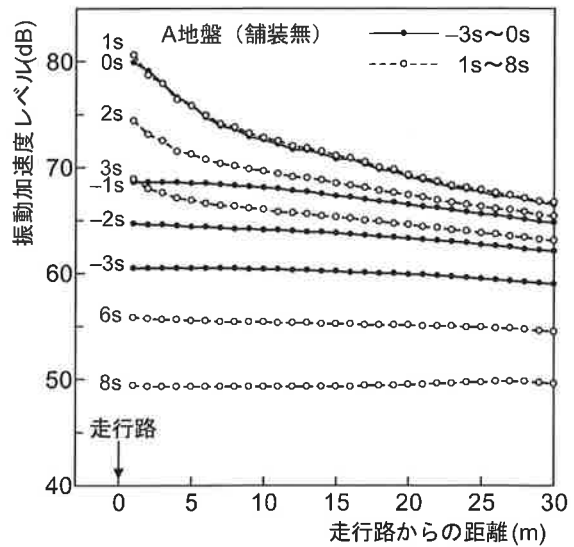


図-7 ユニットパターンの時間ごとの距離変化 (A 地盤, 舗装無)

4. RTV-2003 の距離減衰式に対する見直し

RTV-2003 では、ユニットパターンを計算する距離減衰式を次式のように与えている。

$$L_{Va} = \begin{cases} L_{Va,REF} - 20 \cdot \log_{10} r - 8.68\alpha (r - 1) + 20 \cdot \log_{10} [f(\theta)] & r \leq r_T \\ L_{Va,REF} - 20 \cdot \log_{10} r_T - 10 \cdot \log_{10} (r/r_T) - 8.68\alpha (r - 1) + 20 \cdot \log_{10} [f(\theta)] & r \geq r_T \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 L_{Va} : 走行加振源からの測点の振動加速度レベル, $L_{Va,REF}$: 基準点の振動加速度レベル, r : 加振源から測点までの距離, r_T : 実体波的な減衰から表面波減衰へ変化する点までの距離, α : 地盤の内部減衰係数, $f(\theta)$: 指向特性を与える式で $f(\theta) = 1 - 0.0083\theta$, θ : 加振源と測点を結ぶ直線と道路垂線のなす角度[°]である。なお、基準点は自動車が行く車線中央から測点方向へ 1m 離れた地点と定義しているが、本報では加振源の走行路から 1m 離れた地点としている。式(1)において、見直しする因子は、地盤の内部減衰係数 α と実体波的な減衰から表面波減衰へ変化する点までの距離 r_T (距離減衰変化点 r_T と略)である。指向特性についても見直しを行うが、これについては章を改めて行う。

力学定数を仮定した 2.5D 解析結果に、実測データに基づいて得られた内部減衰係数 α や距離減衰変化点 r_T を適用することに問題はないか調べる。いま、2.5D 解析で得られた舗装端 (5.5m) 以遠の地盤における振動加速度レベル最大の距離減衰に対して最小自乗法を適用して得られた内部減衰係数 α と、この値を用いて計算した距離減衰曲線の 2.5D

解析結果への一致具合を調べたものが図-8である。なお、最小自乗法を適用するに当たっての距離減衰式は、Bornitz 式の表面波に対応する式を用いた。また、同図には RTV-2003 で用いられている内部減衰係数 α と、この値を用いて計算した距離減衰曲線も示した。最小自乗法で求めた内部減衰係数は RTV-2003 の内部減衰係数とは違う値となっており、RTV-2003 のローム地盤 (B 地盤) は $\alpha = 0.014$ 、砂礫地盤 (C 地盤) は $\alpha = 0.031$ とする一意的な与え方は予測精度の向上を目指すには問題があるかも知れない。

最小自乗法で得た内部減衰係数 α を用いて、式(1)により計算した振動加速度レベル最大値の距離減衰曲線と 2.5D 解析結果の一致度を調べたものが図-9である。なお、式(1)の計算では $L_{Va,REF}$ を与えなければならないが、RTV-2003 では試験車走行実験によるデータを用いて回帰分析により $L_{Va,REF}$ を求める式を与えている。しかし、この式を本報の数値解析モデルに対して適用することはできないため、2.5D 解析で求めた 1m 地点 (基準点) の振動加速度レベル最大値を $L_{Va,REF}$ として用いることにした。同図より、B 地盤では一致度は良好であるが、C 地盤では舗装端以遠の地盤部で式(1)による距離減衰曲線は下方に大きくずれている。A 地盤については、最小自乗法による値だけになるが $\alpha = 0.005$ なる値が得られている。この値を用いて計算した式(1)による振動加速度レベル最大値の距離減衰曲線と 2.5D 解析結果の一致度は、図-9 の C 地盤に対する結果とほぼ同様の結果となっている。これらの結果から、式(1)による振動加速度レベル最大値の距離減衰曲線と 2.5D 解析結果の一致度に関係する因子は、地盤の内部減衰係数だけではないことが分かる。

式(1)で計算した振動加速度レベル最大値の距離減衰曲線が 2.5D 解析結果からずれる原因として、距離減衰変化点 r_T に注目してみる。RTV-2003 の距離減衰式の r_T は、文献 10)における検討結果を参考にして決められている。同文献では、粘性のない 3 次元半無限弾性体表面の鉛直調和点加振による鉛直振動解 (Lamb の解と呼ぶ) の距離減衰勾配を検討し、「S 波速度が 100m/s~150m/s に対して、振動の減衰傾向が 6m~24m を境にして変化することが分かった」として、 $r_T=15m$ を採用している。図-10、図-11 は、Lamb の解 (図中、厳密解) と Lamb の解に含まれる幾何減衰の表面波の項および実体波に相当する距離に逆比例する成分を振動源からの距離に対して描いたものである。ただし、実体波の距離減衰は 1m 地点において厳密解に合わせた曲線である。また、図中の振動数は加振振動数を表している。図中に、加振振動数ごとに実体波減衰から表面波減衰に変化すると考えられる距離を一点鎖線で示したが、この距離は加振

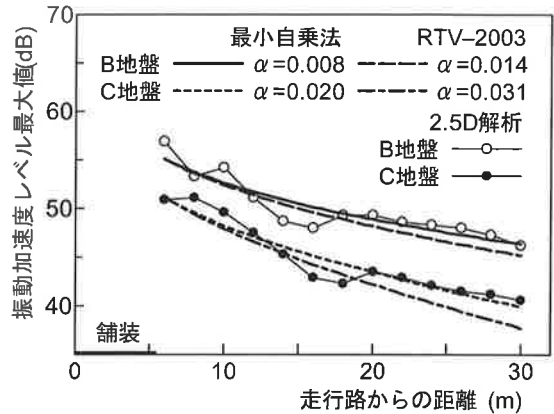


図-8 内部減衰係数 α の取得方法の比較

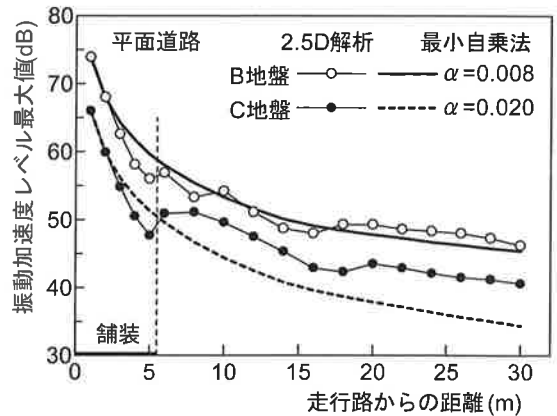


図-9 式(1)に最小自乗法の α を用いた結果

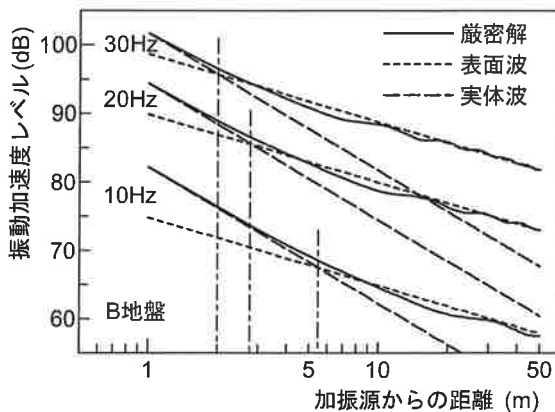


図-10 実体波から表面波へ移る距離 (B 地盤)

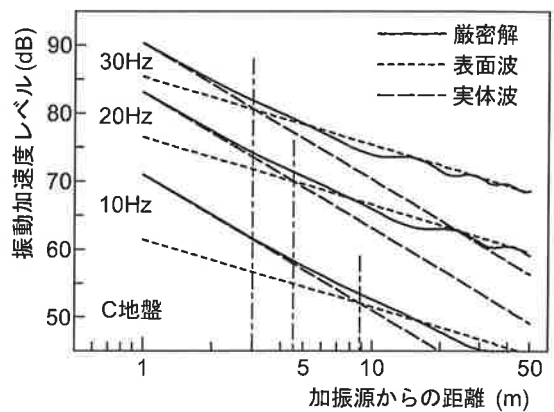


図-11 実体波から表面波へ移る距離 (C 地盤)

振動数や地盤種別によって変わることが分かる。

上述の結果を踏まえて、地盤の内部減衰係数は最小自乗法で求めた値とし、距離減衰変化点 r_T の変化が式(1)で計算した距離減衰曲線に及ぼす影響を調べる。一般的に、自動車走行によって地盤に発生する主要な加振振動数は10数Hzと言われている。図-10、図-11から、幾何減衰が実体波から表面波に変わる距離は、B地盤では4m位、C地盤では6m~7mと読み取れる。いま、距離減衰変化点を $r_T=6m, 10m, 15m$ と変化させて式(1)による振動加速度レベル最大値の距離減衰曲線を2.5D解析による距離減衰曲線と対比したものが図-12である。なお、 r_T が6mより小さくても式(1)の適用上は何ら問題ないが、舗装内に入るため、ここでは $r_T=6m$ を最小値とした。

図-12から、式(1)で計算した距離減衰曲線が2.5D解析結果と一致度が高いのは、A地盤とC地盤では $r_T=6m$ 、B地盤では $r_T=10m$ の場合であるとみなされる。一方、減衰のない半無限弾性体に対する幾何減衰の状況を図示した図-10、図-11では、実体波減衰から表面波減衰に変わる距離はB地盤の方がC地盤よりも小さい。しかるに、図-12では距離減衰変化点 r_T はB地盤の方がC地盤の場合より大きくなっており、明らかに逆の結果となっている。図-12の結果は粘性を有する地盤に対するものであること、先に2.5D解析で調べた板状舗装の変形が伝搬特性に関係するのではないかと考えられることなど、図-10、図-11に基づく推論には疑問が残る。また、図-12のB地盤では $r_T=15m$ の場合も式(1)と2.5D解析による距離減衰曲線はまずまずの一致度を示している。先に述べたように、RTV-2003では文献10)における検討結果を参考にして $r_T=15m$ を採用したとしているが、式(1)による振動加速度レベル最大値の距離減衰曲線と2.5D解析結果の一致度の向上には、距離減衰変化点 r_T を一意的に与えることも問題であるかも知れない。

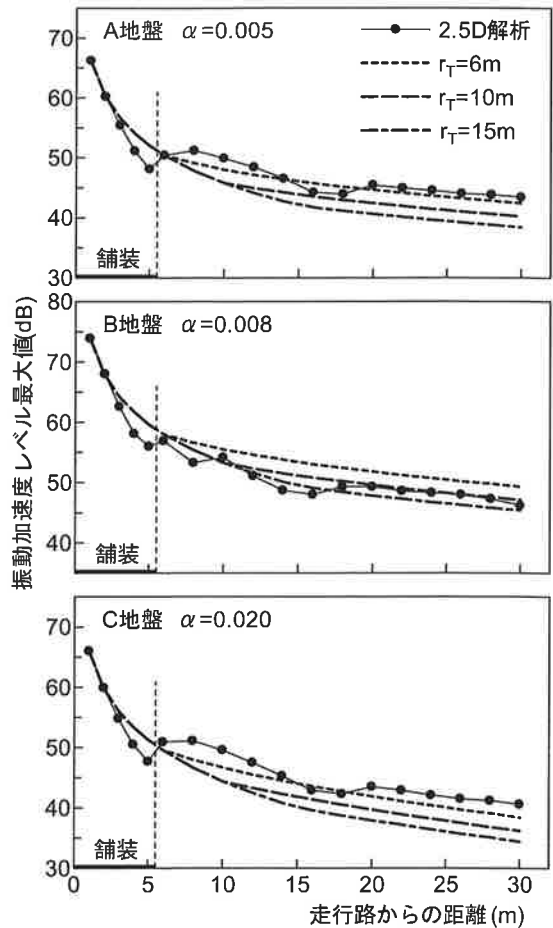


図-12 距離減衰変化点 r_T の影響

5. RTV-2003の指向特性に対する見直し

前章までの議論では、式(1)による振動加速度レベル最大値として、ユニットパターンのピークのレベル値を用いた。式(1)から分かることであるが、この最大値は $\theta = 0^\circ$ のときに得られるため、指向特性の項には関りが無い。一方、RTV-2003では測点の地盤振動を等価振動加速度レベルで評価するため、ユニットパターンから次式で表される単発振動加速度暴露レベル L_{VaE} を計算している。

$$L_{VaE} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{L_{Va,i}/10} \cdot \Delta t \right] \tag{2}$$

ここに、 Δt はユニットパターンの分割時間間隔、 T_0 は1秒で基準の時間である。 $L_{Va,i}$ は、ユニットパターンを Δt 間隔で N 個に分割したとき、 i 番目の振動加速度レベルの値である。また、 $L_{Va,i}$ はユニットパターンのピークから20dB以下のレベル値は無視する。

単発振動加速度暴露レベルは、式(2)から分かるようにユニットパターンの面積を計算している。したがって、ユニットパターンの形に関する指向特性の項は、測点の地盤振動の予測値に大きな関りを持つ。いま、式(1)の指向特性の項を取り出して、この項による補正量を図示してみると図-13のようになる。同図から、測点が走行路に近づくほど補正量が大きくなっている。RTV-2003の検討段階で参考としている文献10)では、実測のユニットパターンと式(1)で指向特性の項を除いた距離減衰式により計算したユニットパターンとの差を補正するために指向特性の項を導入したと記している。同文献で指向特性を数式化した測点の距離は定かではないが、舗装端以遠の地盤上であろうと考えられる。

実測と計算で得られたユニットパターンの形を合わせるため指向特性の項を導入したということは、導入に当たって物理数学的な検討は行われなかったことになる。また、図-13 から分かるように、0m を境として左右対称形となっており、加振源が測線に接近する側と遠ざかる側で同量の補正を施している。一例であるが、2.5D 解析と実測によるユニットパターンの比較を図-14 に示す。ただし、2.5D 解析の 7m 地点におけるピークレベルを実測のピークレベルに合わせた相対的な比較である。また、実測は文献 11) に用いられている振動加速度の実測波形から振動加速度レベル波形に変換したものである。両者のユニットパターンは、加振源が接近する側で立ち上がり急で、遠ざかる側では緩やかな減少となる様子を示している。これは、図-13 に示す左右対称形の指向特性による補正の考え方と合わない。

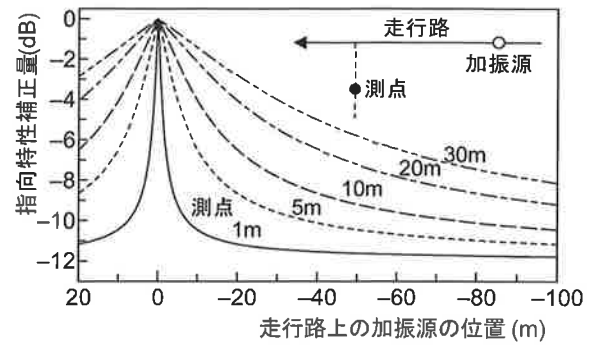


図-13 指向特性による補正量

図-15 は、2.5D 解析によるユニットパターンと式(1)で計算したユニットパターンの対比が距離とともにどのように変わるか調べたものである。なお、横軸の時間は測点間の時間経過を示したのではなく、ユニットパターンの時間長を把握するために時間を示したに過ぎない。また、図-12 の結果を踏まえて、A 地盤では式(1)の r_T を 6m, B 地盤では 15m とした。舗装内 (5.5m 以内) の測点へは適用外であるかも知れないが、1m のユニットパターンは極端に幅が狭くなっており、指向特性の項の汎用性が疑われる。また、図-14 と図-15 の実測と 2.5D 解析によるユニットパターンから、加振源が接近する側と遠ざかる側の現象の違いは、走行中の加振源から発振する地盤振動の指向性の可能性が推測される。これらの現象と、先に論述した舗装と地盤の動的相互作用を考慮した物理数学的に意味ある指向特性の項について検討していく必要がある。

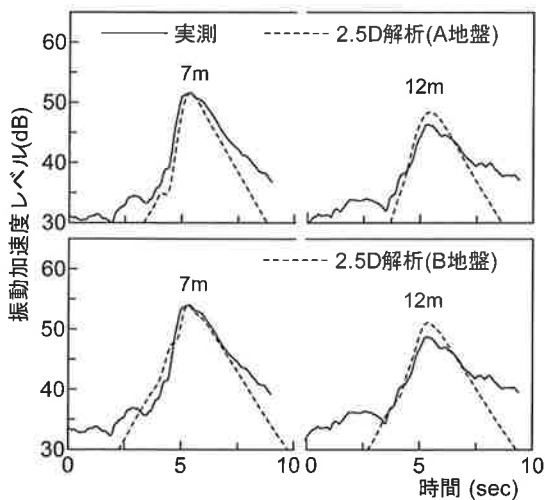


図-14 実測と 2.5D 解析結果の比較

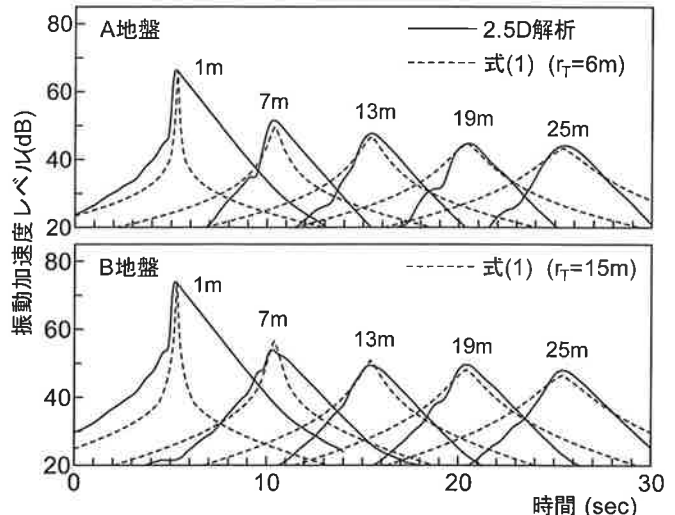


図-15 式(1)によるユニットパターンの距離変化

6. 舗装幅の影響

本報の研究を進めるにあたって、前章までは道路幅員は 2 車線程度を想定して $W=11m$ とし、加振源は舗装の中央を走行させた。これは、幅員幅を一種類として論点を絞り、解析モデルを対称形にすることによって考察の便宜を考えたものである。しかし、舗装-地盤系の動的挙動をさらに詳しく知るためには、舗装幅を変えた場合も調べておく必要がある。ここでは、幅員を $W=21m$ とし、加振源が舗装の中央を走行する場合を取り上げる。

図-16 は舗装上 (10.5m 以内) の測点におけるユニットパターンを図示したものであるが、加振源が接近する側 (負の時間側) では、図-4 の $W=11m$ の場合と同様に、舗装上の測点の距離に関わらず全く一致している。しかし、 $W=21m$ の場合のユニットパターンの特徴ある現象は、5m~10m の測点におけるユニットパターンの形に差がないことで

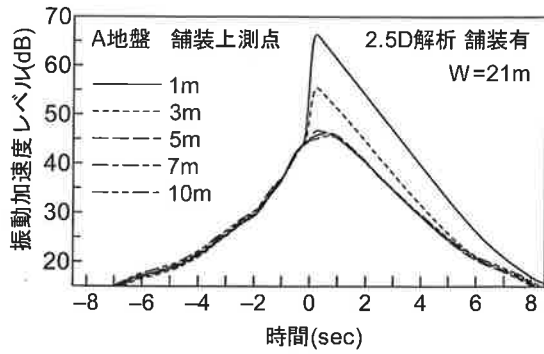


図-16 ユニットパターン (A地盤, W=21m)

ある. この現象を別の角度から見るため, 時間ごとにユニットパターンの測線上の距離に対する変化を図示したものが図-17である. いま, 0s~3sの距離変化に注目すると, 走行路の位置でのピークから急減衰し, 走行路からの距離が5m~舗装端(10.5m)において振動加速度レベルが一様な値となっている. W=11mの場合と同様の推論になるが, 5mから舗装端の間の舗装の変形は一樣に近い状態ではないかと推測される.

図-18は, 2.5D解析と式(1)による振動加速度レベル最大値の距離減衰を比較したものである. W=21mでは, 5m付近から舗装端まで減衰がなく, 地盤部へ入ると急激な減衰を示している. 地盤部では振動加速度レベルは距離に対して変動を示しているが, 式(1)による振動加速度レベル最大値の距離減衰は r_T を15mとした場合がよく合っている. 参考にW=11mの場合も図示したが, この場合は $r_T=6m$ とした方がよく合っている. これらの結果は, 舗装-地盤系における振動加速度レベル最大値の距離減衰には, 実体波動的な減衰から表面波減衰への移行という観点よりも, 舗装幅が関係する可能性を示しているものと考えられ, 今後の検討課題である.

参考のため, 2次元境界要素法(2DBEM)による舗装幅の検討結果を図-19に示す. 加振力には2.5D解析と同じものを使用し, 2.5D解析で得られるユニットパターンのピーク付近に対応する時間内における振動加速度レベルの最大値を読み取っている. 同図は図-18と似通った距離減衰を示しており, 振動加速度レベル最大値の距離減衰に関しては, 加振源の走行の影響よりも舗装と地盤の動的相互作用が注目されるべきことを示唆しているのではないかと考える.

7. おわりに

RTV-2003予測法が提案された当時には, 道路交通振動に対して適用し得る数値シミュレーションは, 固定加振源に対して薄層要素法による3D解析か, FEMやBEMによる2D解析がほとんどであった. このため, 実測に基づいて決められたRTV-2003の距離減衰式の諸因子は, 数値シミュレーション等によって物理数学的な検討が十分になされてい

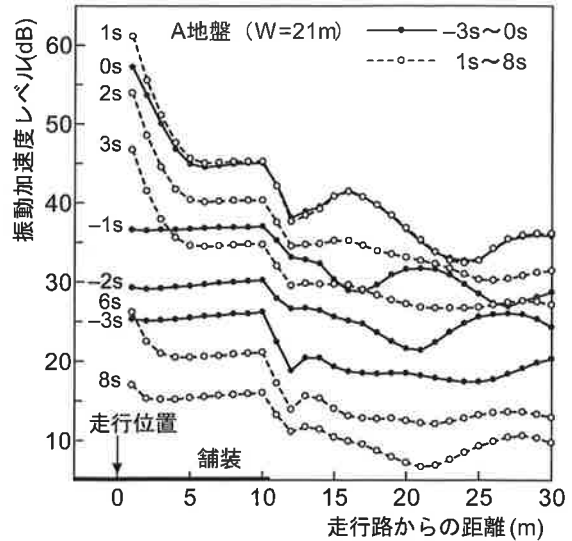


図-17 ユニットパターンの時間ごとの距離変化 (A地盤, W=21m)

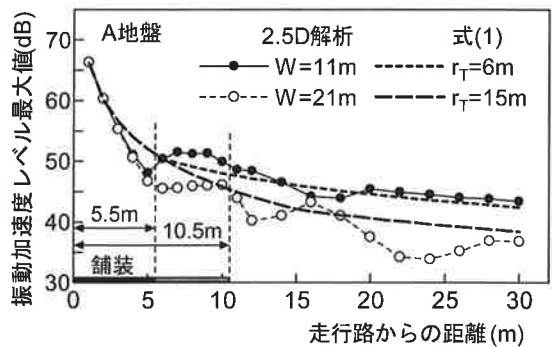


図-18 舗装幅による距離減衰の違い

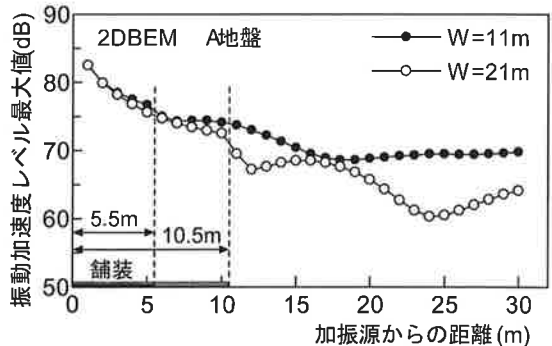


図-19 舗装幅による距離減衰の違い (2D解析)

ないと言える。一方、筆者らは参考文献に挙げたように一連の研究成果を公表してきたが、その過程で数値解析モデルに舗装を組み込まなければ RTV-2003 で用いている距離減衰式の距離減衰特性を議論できないという結論に至った。このような経緯を踏まえて、本報は過去に公表した成果を見直し、新たな数値計算による結果を加えて、距離減衰式の諸因子に対する物理数学的な検討を試みたものである。

本報では、距離減衰式の見直すべき諸因子として、地盤の内部減衰係数 α 、距離減衰変化点 r_T 、指向特性による補正が挙げたが、内部減衰係数 α については振動を予測しようとする地盤を適切に評価して決めれば大きな問題になることはないと考えられる。距離減衰変化点 r_T は、単に距離減衰特性の変化点として捉えるのではなく、舗装と地盤の動的相互作用によって発生する地盤振動の距離減衰曲線に適合させる形で評価する必要性が分かった。指向特性については、舗装-地盤系の動的挙動から、走行する加振源から発振する地盤振動には何らかの指向性が認められるが、RTV-2003の距離減衰式で計算されるユニットパターンは実測や 2.5D 解析によるユニットパターンの特徴を説明し得るものではなかった。以上のような諸因子の問題の解明、解決に当たっては、数値シミュレーションにより現象をもう少し具体的に把握し、実測や 2.5D 解析によるユニットパターンの特徴を説明し得る汎用性のある補正項や補正式の導入を目指すしかない。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 北村泰寿・国松 直：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, 建設工学研究所論文報告集, 第56号, pp. 13-22, 2014.
- 5) 北村泰寿・国松 直・内田季延・平尾善裕：RTV-MODEL 2003予測法のシミュレーションによる検証, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 229-232, 2016.
- 6) 国松 直・北村泰寿・内田季延・平尾善裕：シミュレーションによる盛土・切土道路の予測値へのRTV-MODEL 2003予測法の適合性, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 233-236, 2016.
- 7) 北村泰寿・国松 直・内田季延・平尾善裕：盛土・切土道路からの環境振動予測計算法の構築に関する検討報告, 建設工学研究所論文報告集, 第58号, pp. 9-20, 2016.
- 8) 国松 直・北村泰寿・内田季延・平尾善裕：INCE/J RTV-MODEL 2003予測法の盛土・切土道路への拡張に関する検討報告, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 (N-2017-03), pp. 1-8, 2017.
- 9) ISO : Proposals for Generalized Road Inputs to Vehicles, Draft international Standard, *ISO/DIS 2631*, pp. 1-17, 1972.
- 10) 横田明則：道路交通振動の予測, 騒音制御, Vo. 18, No. 6, pp. 18-21, 1994.
- 11) 国松 直・北村泰寿・平尾善裕：地盤振動伝搬特性に及ぼす地盤特性と加振力特性の影響, 日本騒音制御工学会春季研究発表会講演論文集, pp. 61-64, 2009.

著 者

北村 泰寿 元所員, 工学博士, 構造力学, 振動工学

国松 直 産業技術総合研究所 (客員研究員), 工学博士, 振動工学