

【建設工学研究所論文報告集 58 号 [報告] 2016 年 11 月】

## 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

### Research Report on Construction of Prediction Method

### for Environmental Vibration by Road Traffics in Banked Road and Cut Road

北村 泰寿      国松 直      内田 季延      平尾 善裕  
Yasutoshi Kitamura      Sunao Kunimatsu      Hidenobu Uchida      Yoshihiro Hirao

#### 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>（以下、RTV-2003 と略記）が提案されており、騒音の場合と同じ考え方で、道路上を 1 台の自動車が走行したときの一つの予測地点における振動加速度レベルの時間変化（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。その後、RTV-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。

日本騒音制御工学会道路交通振動予測式作成分科会では、シミュレーション手法を用いて RTV-2003 の盛土・切土道路への拡張を検討してきた。これまでの経過を再考すると、RTV-2003 における基準点の振動加速度レベル ( $L_{Va,REF}$ ) を原単位とする距離減衰式のあり方に関する検討が中心で、検討結果は距離減衰式の変更を求めるものとなり、盛土・切土道路への RTV-2003 の拡張を手詰まり状態にさせていた。このような状況を踏まえ、本報告では RTV-2003 に潜在する問題点を考究し、まず実測データに基づく距離減衰式の平面道路への適用性をシミュレーションにより確認する。この検討結果を踏まえて、距離減衰式の盛土・切土道路への適用性、道路構造が振動伝搬特性に及ぼす影響などについて考察を加え、RTV-2003 を盛土・切土道路へ拡張するための方針を取りまとめる。

本報告では 2.5 次元解析を適用し、盛土道路に対しては境界要素法 (BEM) と薄層要素法 (TLM) のハイブリッド法、切土・掘削道路に対しては BEM を用いた。2.5 次元 BEM、2.5 次元 TLM の定式の詳細については、紙面の都合上既報の文献 4)、5) に譲る。なお、本報告は、RTV-2003 の予測法を改良することが目的ではなく、実測に代わるシミュレーション結果への適合性を調べたものである。

#### 2. RTV-2003 の距離減衰式に対する検討経過

RTV-2003 における距離減衰式は次式で与えられている<sup>2)</sup>。

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

ここに、 $L_{Va}$  は点振源からの振動加速度レベル (dB)、 $L_{Va,REF}$  は基準点 (車線中央から予測地点方向へ 1m 離れた地点) の振動加速度レベル (dB)、 $r$  は点振源から予測地点までの距離 (m)、 $r_T$  は実体波動的な減衰特性から表面波動的な減衰特性への変化点までの距離 (m) で  $r_T=15\text{m}$ 、 $\alpha$  は地盤の内部減衰係数 (1/m) である。また、 $f(\theta)$  は振動伝搬の指向特性を表わし、 $\theta$  を点振源と予測地点を結ぶ直線と道路垂線のなす角度 ( $^\circ$ ) として、 $f(\theta)=1-0.0083\theta$  で与えられる。

図-1は、ローム地盤と砂礫地盤について、シミュレーションとRTV-2003によって得られたユニットパターンのピークレベル（振動加速度レベル（VAL）の最大値）を車線からの距離に対して描いたものである。シミュレーションの方法については紙面の都合上省略するので、既報の文献5）、6）を参照されたい。ローム地盤と砂礫地盤の力学定数および地盤の内部減衰係数を表-1に示す。RTV-2003の距離減衰式における $L_{va,REF}$ については、実測データの統計処理によって得られたRTV-2003の $L_{va,REF}$ を使うことができないため、本報告ではシミュレーションによる1m地点のユニットパターンのピークレベルを $L_{va,REF}$ として用いる。

同図より、RTV-2003の距離減衰はシミュレーションよりも減衰効果が大きく、31m地点においてその差は12dB程度になっている。ただ図をよく見れば、車線からの距離が短い区間ではRTV-2003の減衰勾配が大きく、15m程から以遠ではRTV-2003とシミュレーションによる距離減衰はほぼ同じ勾配となっていることが分かる。この車線から短い距離区間におけるRTV-2003の大きな距離減衰勾配をどう考えるかが、「はじめに」で述べた $L_{va,REF}$ を原単位とするRTV-2003の距離減衰式のあり方に関する検討課題であった。

図-2は、舗装の有無が振動加速度レベル最大値の距離減衰特性に及ぼす影響を調べたものである。なお、舗装の全幅は11mで、厚さは25cmであるが、舗装のモデル化に対する考え方については後述する。舗装無視の距離減衰は図中に示す括弧書きの値を減じて示したが、これは周辺地盤での距離減衰特性を比較しやすくするため適当な値を減じたものである。RTV-2003の予測法の考え方では、等値換算厚 $T_A$ （RTV-2003では等値総厚と表記）を導入して舗装による振動加速度レベルの低減を行っている。また、図-1において、RTV-2003の距離減衰曲線を約12dB上方に移動させれば、周辺地盤部では距離減衰曲線がシミュレーションのそれとほぼ一致する。これらの結果から、RTV-2003による距離減衰のシミュレーション結果への適合性の検証において、舗装の問題よりも基準点の振動加速度レベル $L_{va,REF}$ を如何に決定するかが論点であった。

このような検討経緯ではあったが、RTV-2003の等値換算厚 $T_A$ による $L_{va,REF}$ の低減は1m地点での振動加速度レベルを減じることを意味するだけで、図-2に見られる舗装部での急激な距離減衰については何ら触れていない。したがって、本報告では舗装を考慮した2.5次元シミュレーションによるユニットパターンおよび振動加速度レベルの距離減衰を比較対象として、RTV-2003の距離減衰式の適合性を改めて検証することとした。

表-1 ローム地盤、砂礫地盤の力学定数

	$V_s$ m/s	密度 $kg/m^3$	ポアソン比	減衰定数	内部減衰係数
ローム地盤	130	1,400	0.3	0.02	0.014
砂礫地盤	200	2,000	0.35	0.04	0.031

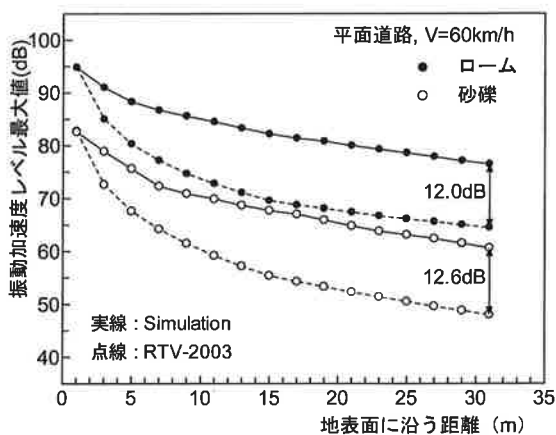


図-1 振動加速度レベル最大値の距離減衰

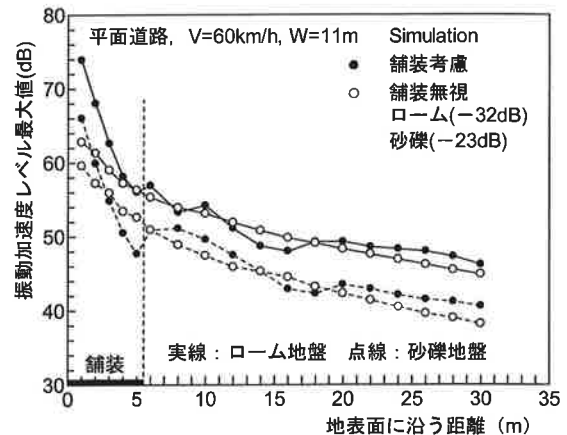


図-2 舗装の有無が距離減衰に及ぼす影響

### 3. ユニットパターンの分割個数

ユニットパターンを用いるRTV-2003の予測法では、単発振動加速度暴露レベル( $L_{vaE}$ )を計算するため、点振源

を配置する道路縦断方向の範囲が規定されている。その範囲は、予測地点から車線中央に下した垂線の交点を中心に、左右に垂線距離の10倍とし、分割個数は最低40個としている。一方、盛土・切土道路へのRTV-2003の拡張を提案した文献<sup>3)</sup>では、LvaEの計算にはユニットパターンのピーク値から20dB小さいレベルまでの振動加速度レベルを用いている。予測計算方法の一環として、本報告の展開の前にLvaEの計算方法を決めておく必要がある。

図-3は、図-1のデータに対して、上記の2方法によって計算したLvaEの距離減衰を示したものである。図中、RTV-2003は前者の方法、Max-20dBは後者の方法によるLvaEを指す。また、ユニットパターンの分割はRTV-2003の40個の分割幅となっているため、Max-20dBによる分割数は40個より少ない。同図より、両方法によるLvaEの差異がほとんど認められないことから、RTV-2003でdBの和に取り込まれないピーク値から20dB以下の振動加速度レベルは不要であることを示している。

ところで、RTV-2003のようにユニットパターンの分割数を固定する場合、予測地点ごとにユニットパターンの分割時間間隔が異なることになり、RTV-2003の距離減衰式の適合性をシミュレーション等で検証する場合には時間間隔を合わせる事が面倒である。ここには図示していないが、時間間隔を0.1秒と0.01秒にして、Max-20dBによる方法で算出したLvaEの距離減衰を比較した結果、これらの距離減衰曲線は全く重なっており、時間間隔は何れを取っても良いことが分かった。これより、本報告では、ユニットパターンのピーク値から20dB小さいレベルまでの振動加速度レベルを0.1秒間隔で読み取る方法の採用が妥当であると考えられる。

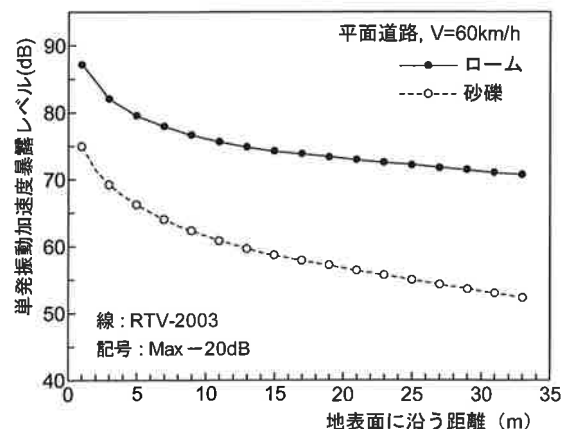


図-3 ユニットパターン分割方法の検討

#### 4. 舗装のモデル化

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おり、表層と基層は合わせて10cm程度の厚さである。この舗装構造をモデル化して2.5次元BEM数値解析を行う場合、全層をモデル化するとパソコンでは演算時間が掛り過ぎるという問題が生

じる。また、厚さが薄い層をモデル化すると正確な数値解が得られなくなるという問題も生じる。このため、全層をモデル化する代わりに、表層、基層、上層路盤を一体とした舗装と下層路盤と路床・地盤を一体とした図-4に示す板状モデル-地盤系にモデル化する。なお、後述のシミュレーションでは、舗装幅は路側帯を含む2車線の $W=11\text{m}$ とし、舗装幅の影響を見るときには $W=21\text{m}$ に広げる。

表-2に舗装構造の設計例を示す。設計例1は分科会資料の舗装構造の一例、設計例2は(社)日本道路協会が示している一例でC交通の場合の舗装構造である(設計例2はインターネット検索による)。これらの舗装構造の表層、基層、上層路盤を一体とした板状舗装



図-4 アスファルト舗装の近似モデル

表-2 舗装構造の設計例

		厚さ	弾性係数	密度	ポアソン比
設計例1	高機能舗装I型	4	4,000	1,980	0.35
	ストアス	6	8,000	2,360	0.35
	AS安定処理	15	9,100	2,360	0.35
	粒状材料	20	170	2,200	0.35
	路床	—	460	—	0.35
設計例2	表層・基層	10	9,000	—	0.35
	AS処理	10	6,100	—	0.35
	粒調碎石	25	300	—	0.35
	クラッシュラン	40	200	—	0.35
	路床	—	40	—	0.4

単位 厚さ: cm, 弾性係数: MPa, 密度: kg/m<sup>3</sup>

の力学定数を表-3 のように与える。地盤については、後述でローム地盤、砂礫地盤、モデル地盤の3種類を考慮しており、地盤種別に合わせて舗装の厚さを変える。なお、ローム地盤と砂礫地盤の力学定数および地盤の内部減衰係数は

表-1 に示した。モデル地盤は、道路交通振動予測式作成分科会に提出した検討資料や既報の文献 4)~6)等 で一般的に用いてきた地盤である。その力学定数は、 $V_s=200\text{m/s}$ 、密度  $1,800\text{kg/m}^3$ 、ポアソン比  $0.33333$ 、減衰定数  $0.02$ 、地盤の内部減衰係数  $0.02$  とする。

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、ローム地盤では設計 CBR を 3 程度、砂礫地盤とモデル地盤では設計 CBR を 6~8 と仮定し、交通量を C 交通とすれば、ローム地盤では  $T_A=35\text{cm}$  程度、砂礫地盤とモデル地盤では  $T_A=26\sim 28\text{cm}$  となる。一方、表-2 から下層路盤の等値換算厚は、設計例 1 で  $7\text{cm}$ 、設計例 2 で  $10\text{cm}$  となる。これらの値をローム地盤、砂礫地盤、モデル地盤の等値換算厚  $T_A$  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、ローム地盤では  $25\sim 28\text{cm}$ 、砂礫地盤、モデル地盤では  $16\sim 21\text{cm}$  となる。これらを踏まえて、表-3 に力学定数を示した板状舗装の層厚はローム地盤で  $h=25\text{cm}$ 、砂礫地盤、モデル地盤で  $h=18\text{cm}$  と仮定する。

表-3 モデル化した舗装の力学定数

	厚さ	弾性係数	密度	ポアソン比	減衰定数
舗装	18, 25	7,500	2,300	0.35	0.03
単位 厚さ : cm, 弾性係数 : MPa, 密度 : kg/m <sup>3</sup>					

## 5. RTV-2003 の距離減衰式に対する再検討

道路交通振動予測式作成分科会に提出した検討資料や文献 4)~6)等では、舗装無しの場合の地盤モデルに対して RTV-2003 の距離減衰式の適用性の検討を行い、基準点の振動加速度レベル ( $L_{va,REF}$ ) の求め方を論点の中心に置いてきた。シミュレーションによるユニットパターンや  $L_{vaE}$  と適合性が良い表面波の距離減衰式から  $L_{va,REF}$  を推定する方法、RTV-2003 の距離減衰式によるユニットパターンに平滑化を施して  $L_{va,REF}$  を求める便宜的な方法などを提案した。しかし、RTV-2003 における  $L_{va,REF}$  は実測データに基づく統計的処理によって得られたという事実に対して、上述のような処理を行って  $L_{va,REF}$  を求めたとする論理は説得力に乏しい。

図-2 に示したように、舗装有りの場合の舗装部における振動加速度レベル最大値の距離減衰は舗装無しの場合に比べて勾配が大きい。既報告書等では、舗装無しの場合には表面波の距離減衰式の適合性が良いことを示したが、舗装有りの場合には距離による減衰勾配がより大きい距離減衰式を用いる必要があることが分かる。そこで、15m まで実体波の距離減衰式を用いる RTV-2003 の距離減衰式の適用を試みる。

RTV-2003 の予測法では、等価振動加速度レベル ( $L_{vaeq}$ ) で評価するため、単発振動加速度暴露レベル ( $L_{vaE}$ ) を求めている。したがって、シミュレーションと RTV-2003 の距離減衰式のそれぞれによるユニットパターンから算出する  $L_{vaE}$  の距離減衰を比較して、RTV-2003 の距離減衰式の適合性を検証するのが妥当な方法と考える。図-5~図-7 は、RTV-2003 の距離減衰式の  $L_{va,REF}$  をシミュレーションによる 1m 地点のユニットパターンのピーク振動加速度レベルとして、RTV-2003 による  $L_{vaE}$  の距離減衰をシミュレーションによる  $L_{vaE}$  の距離減衰と比べたものである。同図の RTV-2003 による距離減衰には、式(1)において指向性を無視した場合 (点線白丸) と指向性を考慮した場合 (破線白四角) の両方を示した。

シミュレーションと RTV-2003 による距離減衰の差は、ローム地盤ではほとんどないが、砂礫地盤とモデル地盤ではかなり生じている。シミュレーションにおける地盤の減衰定数  $\eta$  と、RTV-2003 における地盤の内部減衰係数  $\alpha$  の関係によっては砂礫地盤とモデル地盤では差が小さくなる可能性はあ

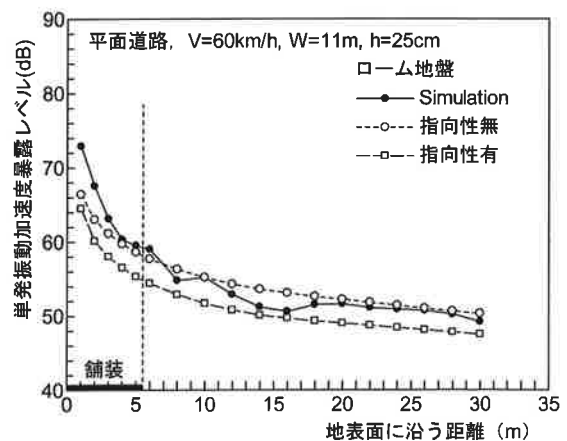


図-5 距離減衰の比較 (ローム地盤)

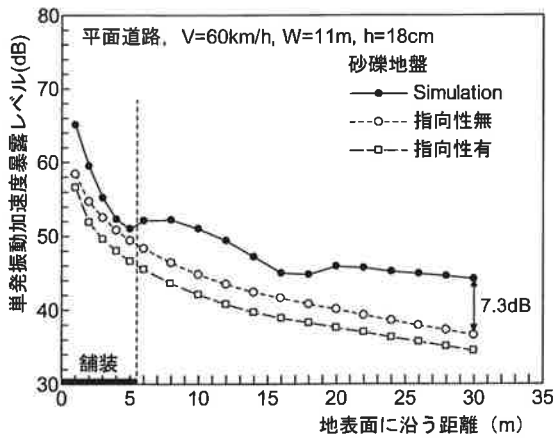


図-6 距離減衰の比較 (砂礫地盤)

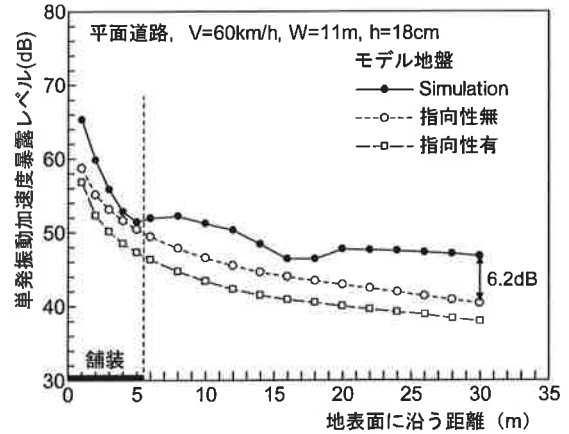


図-7 距離減衰の比較 (モデル地盤)

る。内部減衰係数  $\alpha$  と減衰定数  $\eta$  の間には、次式の関係があるとされている。

$$\alpha = 2\pi f\eta/V_s$$

いま、 $f$  を自動車のバネ下振動数程度の  $f=14\text{Hz}$  とすると、ローム地盤で  $\alpha=0.014$ 、砂礫地盤で  $\alpha=0.018$ 、モデル地盤で  $\alpha=0.009$  となり、砂礫地盤 ( $\alpha=0.031$ )、モデル地盤 ( $\alpha=0.02$ ) では減衰係数を大きく見積もっている可能性もある。ただ、砂礫地盤に対しては RTV-2003 では実測データに基づいて  $\alpha=0.031$  なる値が用いられており、シミュレーションでも  $\eta=0.04$  と大きく設定している。したがって、シミュレーションにおける減衰定数  $\eta$  以外の計算条件が関係してくることになるが、種々の資料に基づいて客観的に力学定数を設定しており、力学定数の見直しは恣意的な判断を入れることになりかねない。

図-8~図-11 にユニットパターンの距離に対する変化を示す。図-9 は図-8 に対応した図で、指向性有りの場合のユニットパターンの距離変化を参考のため示したものである。また、図-10 は、図-2 のローム地盤に対応したユニットパターンの図で、舗装の有無がユニットパターンの形に及ぼす影響を見たものである。なお、同図で舗装無しの場合の 1m 地点におけるユニットパターンのピークを舗装有りの場合のピークに合わせてある。

図-8 のローム地盤について、指向性無しの場合のユニットパターンは、距離が遠くなるとともにピークが下がり扁平状になってきているが、ユニットパターンの面積として求まる  $L_{vaE}$  は、図-5 に見られるようにシミュレーションによる  $L_{vaE}$  とよく合っている。一方、図-9 の指向性有りのユニットパターンは、距離に対するピークの下がり方は指向性無しの場合と同じとなるが、シミュレーションによるユニットパターンと形の適合性は良くなっている。結果的に、ユニットパターンの面積で評価する  $L_{vaE}$  は、図-5 に見られるように指向性無しの場合より  $L_{vaE}$  のシミュレーション結果への適合性は悪くなっている。図-10 では、図-2 で分かったように舗装による振動加速度レベルの距離減衰効果が影響して、舗装有りのユニットパターンは舗装無しの場合より幅が狭くなっていることが分かる。

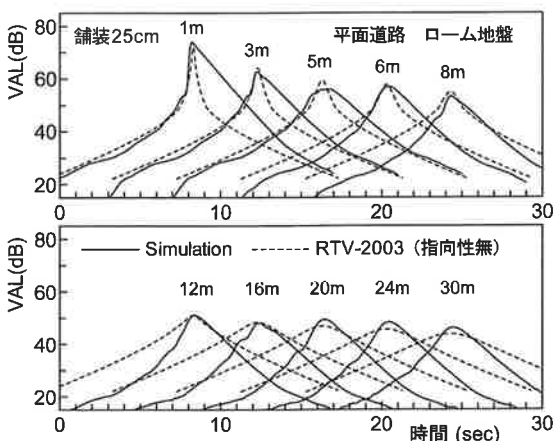


図-8 ユニットパターン (ローム, 指向性無)

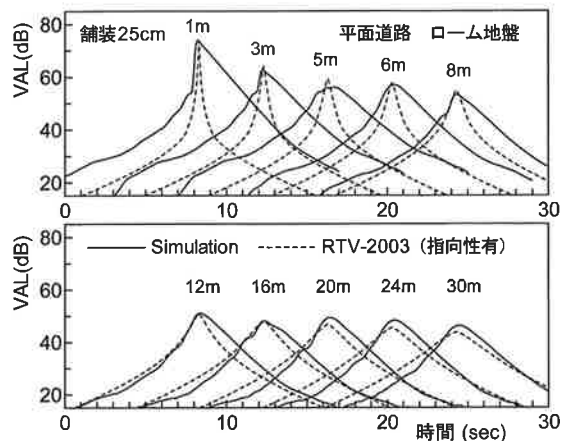


図-9 ユニットパターン (ローム, 指向性有)

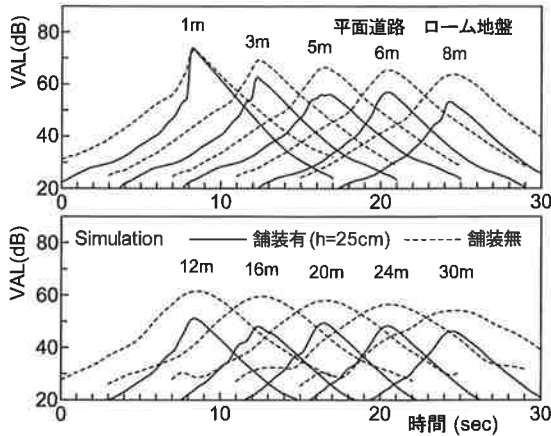


図-10 ユニットパターン（ローム、舗装有無）

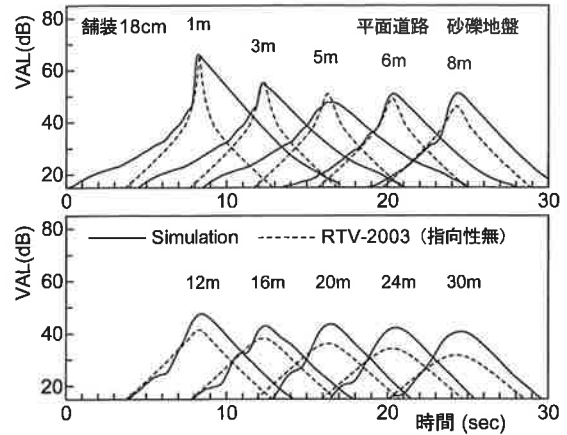


図-11 ユニットパターン（砂礫地盤）

図-11 の砂礫地盤では、距離が遠くなるとともにユニットパターンのピークが大きく低下している。ここには図示していないが、モデル地盤についても砂礫地盤と同様の結果が得られている。このピークが低下する影響により、図-6、図-7に示す  $L_{vaE}$  の距離減衰は、シミュレーションによる  $L_{vaE}$  の距離減衰より下方に離れている。これらの場合においても、指向性有りの場合の  $L_{vaE}$  の距離減衰は指向性無しの場合よりシミュレーション結果への適合性は悪くなっている。RTV-2003 では、指向性は実測値との整合性を良くするために導入されたが、その物理的意味は明確にされていない。図-5～図-7 の結果を踏まえて、式(1)の RTV-2003 の距離減衰式から指向性の項を取り除くことが妥当であると考える。

RTV-2003 の距離減衰式における基準点の振動加速度レベル ( $L_{va,REF}$ ) は、舗装道路における実測データの統計処理によって得られている。これまでの報告書等では、この  $L_{va,REF}$  を用いた式(1)のあり方を舗装無しの地盤モデルに対するシミュレーション結果から説明することを試みてきた。また、舗装無しの地盤モデルの採用に当たっては、舗装の効果は等値換算厚  $T_A$  によって考慮されるため問題はないとしたが、舗装部で振動が大きく減衰し、地盤部の振動加速度レベルを大きく減少させる現象に対する認識が不足していた。

図-6、図-7 では、RTV-2003 による  $L_{vaE}$  はシミュレーションによる  $L_{vaE}$  と少なからず差を有するが、実測の現象を概ね説明していると考えられ、指向性の項を取り除いた RTV-2003 の距離減衰式の適合性は良好であると判断できる。これを踏まえて、盛土・切土道路への RTV-2003 の指向性を除いた距離減衰式の拡張に当たっては、舗装の影響を考慮しながら検討を進める。

6. RTV-2003 の距離減衰式の盛土・切土道路への適用性

盛土・切土道路の解析モデルを図-12 に、計算する道路構造のケースを表-4 に示す。これらの道路構造モデルに対して、シミュレーションと RTV-2003 の距離減衰式（指向性無し）によるユニットパターンから算出した  $L_{vaE}$  の距離減衰を比較する。なお、地盤の内部減衰係数は  $\alpha=0.02$  としたが、ケース 6 の原地盤についてはローム地盤の内部減衰係数を  $\alpha=0.014$  とした。

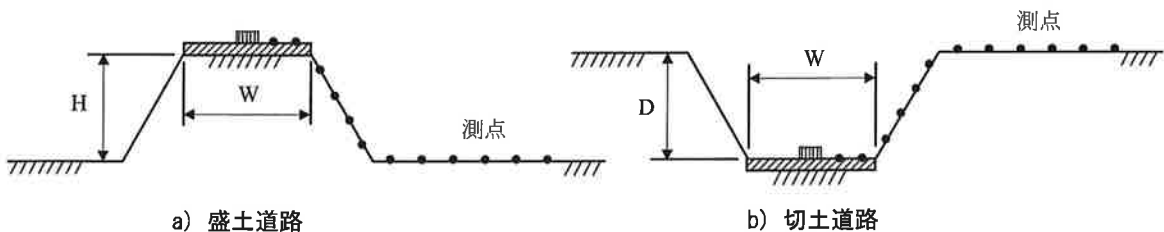


図-12 盛土・切土道路の解析モデル

表-4 道路構造の諸元

	ケース	高さ(H) 深さ(D)	幅(W)	車速(V)	法面勾配	原地盤の物性	地盤の減衰係数
盛土	1	2 m	11 m	60 km/h	30°	盛土と同じ	0.02
	2	3 m	11 m	60 km/h	30°	盛土と同じ	0.02
	3	5 m	11 m	60 km/h	30°	盛土と同じ	0.02
	4	3 m	21 m	60 km/h	30°	盛土と同じ	0.02
	5	3 m	11 m	80 km/h	30°	盛土と同じ	0.02
	6	3 m	11 m	60 km/h	30°	ローム地盤	0.02 と 0.014
切土	7	3 m	11 m	60 km/h	30°	—	0.02

ところで、盛土・切土道路への RTV-2003 の拡張を提案した文献 3) では、伝搬経路について地中の最短斜距離を実体波が伝搬するという考え方を採用している。しかし、この考え方は波動論的に適切ではないというこれまでの検討経過を踏まえて、盛土道路、切土道路ともに地表面に沿って伝搬するものとする。なお、この点については後述の図で、再度説明する。また、同文献では、回折減衰が取り入れられているが、空气中を伝搬媒体とする音波（P 波）の障壁による回折のように地盤振動の伝搬は単純ではない。とくに、伝搬媒体の地中を最短斜距離で実体波が伝わり、この最短斜距離と平面道路とした場合の水平距離との距離差による減衰（距離減衰）を回折減衰とする考え方は物理的に明確ではない。したがって、本報告では回折減衰は取り入れないこととする。

盛土高さ 3m のケース 2 について、いくつか基本的な傾向について見ておく。なお、盛土・切土道路に対するユニットパターン図の距離表示と振動加速度レベルや LvaE の距離減衰図の横軸は、予測地点から加振源の走行路に下した垂線と走行路の交点から、盛土・切土の斜面を介して地表面に沿って取った測線上の距離である。

図-13 は、舗装の有無が振動加速度レベル最大値の距離減衰特性に及ぼす影響を調べたものである。舗装無しの距離減衰は図中に示す括弧書きの値を減じて示したが、これは周辺地盤での距離減衰特性を比較しやすくするため適当な値を減じたものである。図-2 と同様に、舗装有りの場合、舗装部において振動加速度レベルの大幅な低減が見られ、15m まで実体波の減衰とする RTV-2003 の距離減衰式の適用性が認められるところである。

図-14 は、RTV-2003 の距離減衰式の  $L_{va,REF}$  をシミュレーションによる 1m 地点のユニットパターンのピーク振動加速度レベルとして、RTV-2003 による LvaE の距離減衰をシミュレーションによる LvaE の距離減衰と比べたものである。同図には、文献 3) で提案されている地中の最短斜距離を実体波が伝搬するという考え方に基づく LvaE の距離減衰（地中伝搬と表示）も示した。波動論的にも適切ではないが、距離減衰曲線も法尻以遠で地表面伝搬より小さくなっており、予測法として採用し難い。同図より、RTV-2003 による LvaE はシミュレーション結果と少なからず差を有するが、平面道路の場合と同程度の差であり実測の現象を説明し得るものと考えられる。

図-15、図-16 にユニットパターンの距離に対する変化を示す。図-15 より、原地盤部（斜面に沿う距離で 11.5m 以遠）では、RTV-2003 とシミュレーションによるユニットパターンの形は似通っているが、距離とともに RTV-2003 のピークがシミュレーションのピークより下がっており、これによって RTV-2003 による LvaE がシミュレーションによる LvaE よりも小さくなったことが分かる。また、図-16 は、舗装無しの 1m 地点におけるユニットパターンのピークを舗装有りの場合のピークに合わせて、舗装の有無がユニットパターンの形に及ぼす影響を見たものである。同図より、舗装による振動加速度レベルの距離減衰効果が影響して、舗装有りのユニットパターンは舗装無しの場合より幅が狭くなっていることが分かる。これらの結果は、平面道路において論述した内容と何ら変わらないと言える。

図-17、図-18 は、盛土高さの影響を見るため、高さ H=2m のケース 1 と H=5m のケース 3 に対する LvaE の距離減衰を対比して示したものである。図-14 と合わせて盛土高さの影響を見ると、高さが大きくなるとともに RTV-2003 による LvaE とシミュレーションによる LvaE との差が開く傾向にある。これより、RTV-2003 を盛土・切土道路へ適用する場合、盛土・切土の高さに制限を設ける必要があるかも知れない。

盛土高さ 3m で舗装幅を広げたケース 4、車速を上げたケース 5、原地盤をローム地盤としたケース 6、切土で深さ

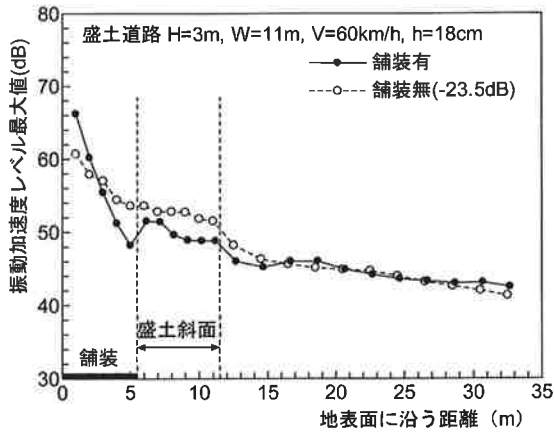


図-13 舗装の有無が距離減衰に及ぼす影響

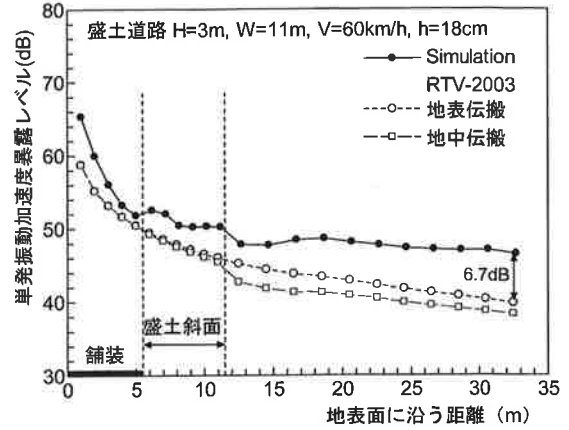


図-14 LvaEの距離減衰の比較 (ケース2)

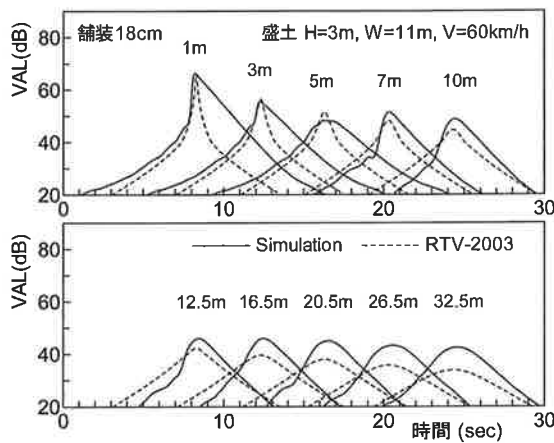


図-15 ユニットパターン (ケース2)

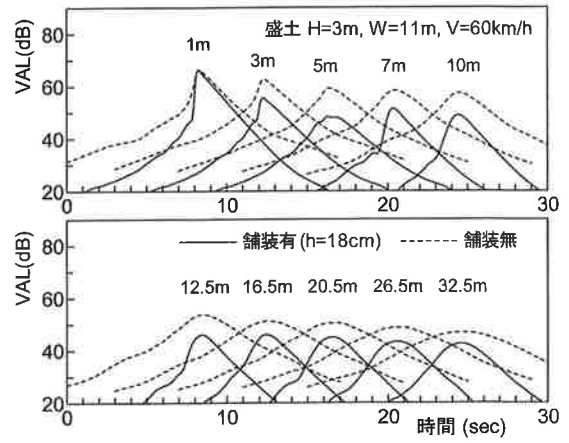


図-16 ユニットパターンへの舗装の影響

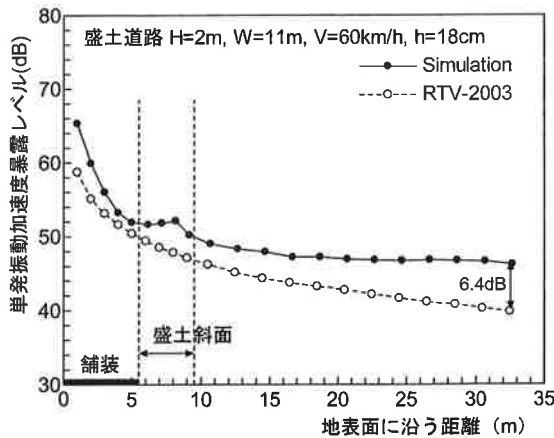


図-17 LvaEの距離減衰の比較 (ケース1)

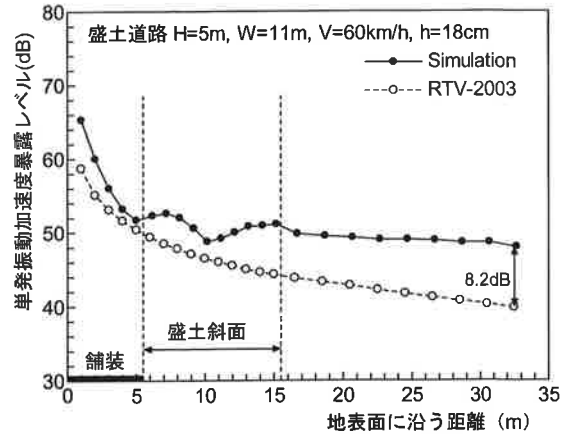


図-18 LvaEの距離減衰の比較 (ケース3)

が3mのケース7に対するシミュレーションによるLvaEとRTV-2003によるLvaEの距離減衰の比較を、図-19～図-22に示す。

図-19はケース2(図-14)の盛土天端を広げたケースで、シミュレーションによるLvaEは広がった舗装部分で減衰するため、RTV-2003によるLvaEの距離減衰とよく合っている。ただ、盛土斜面での振動加速度レベルの変動がケース2より大きく、舗装部の影響が大きくなっているのかも知れない。図-20はケース2の車速を上げたケースで、LvaEのレベルがケース2より全体に大きくなっているが、距離減衰の状況、シミュレーションとRTV-2003によるLvaEの差は良く似ている。



図-21 は、盛土が原地盤と違う材料で構築されている場合を想定して、ケース 2 において原地盤をローム地盤とした場合の比較である。原地盤に対する内部減衰係数は、RTV-2003 で用いられている  $\alpha=0.014$  とした。シミュレーションによる LvaE は盛土斜面で大きく変動しており、これに引きずられる形で法尻近傍の原地盤の振動は大きくなっている。約 20m 以遠では、シミュレーションと RTV-2003 による LvaE の距離減衰はほぼ同じ減衰勾配となっており、ローム地盤の内部減衰係数を用いたことは適切であったと判断できる。

図-22 は切土道路に対する結果であるが、シミュレーションによる LvaE の距離減衰を同じ高さの盛土に対する図-14 (ケース 2) の結果と比べると、斜面部で盛土よりやや変動が大きく、RTV-2003 による LvaE との差も少し大きい。シミュレーションによる波動が地中の最短距離を伝搬しているとするなら、シミュレーションによる盛土道路と切土道路の LvaE の距離減衰特性は違ったものになると考えられ、この面からも文献 3) の考え方は合理的ではない。

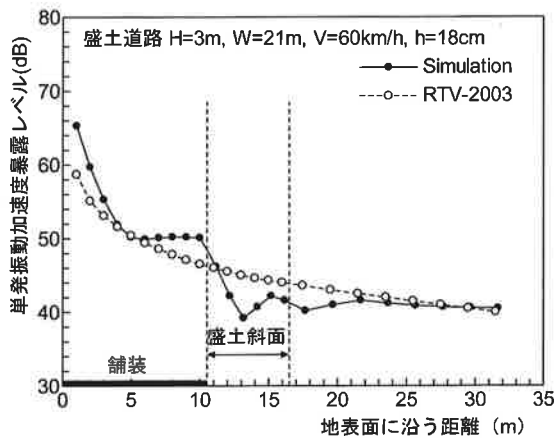


図-19 LvaE の距離減衰の比較 (ケース 4)

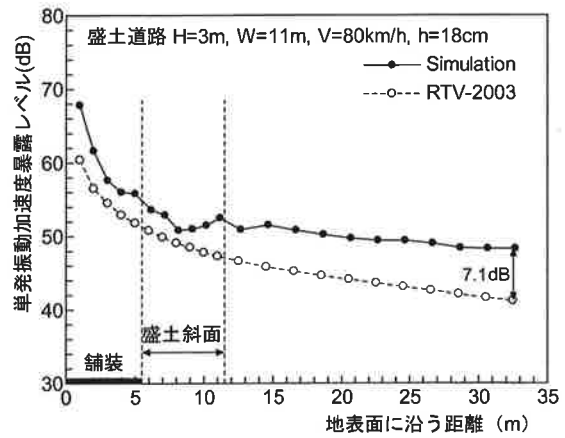


図-20 LvaE の距離減衰の比較 (ケース 5)

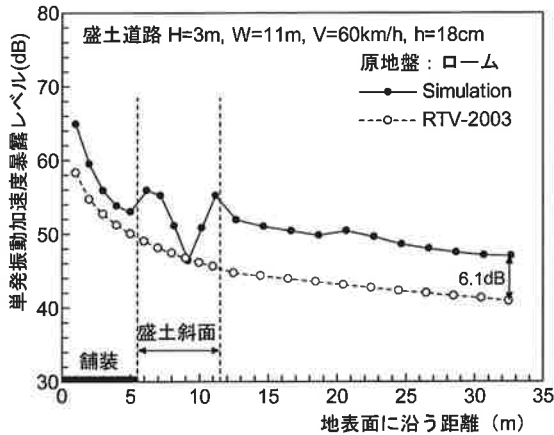


図-21 LvaE の距離減衰の比較 (ケース 6)

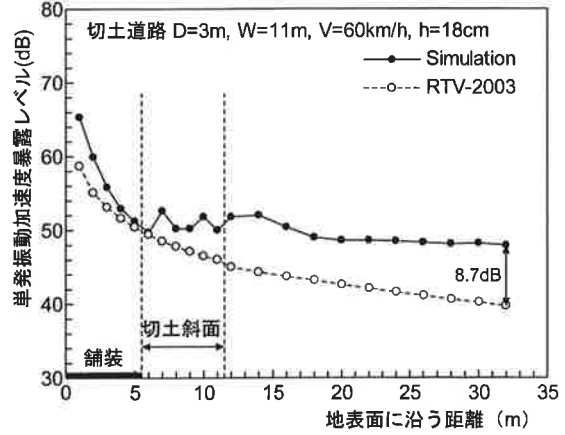


図-22 LvaE の距離減衰の比較 (ケース 7)

7. 擁壁が振動伝搬特性に及ぼす影響

掘削道路では側壁が直立するためコンクリート擁壁等が用いられるが、この存在が周辺の地盤振動の距離減衰特性に影響を及ぼすことが考えられる。両側に擁壁を有する掘削道路の計算は、計算コスト (容量×時間) の面から実行し難いため、片側にコンクリートの直立擁壁のあるモデルに対して、擁壁の有無による距離減衰特性を比較する。

図-23 に片側にコンクリート擁壁を有する道路の解析モデルを示す。予測地点は道路上と擁壁天端から広がる水平地面上に設ける。図-24 は、擁壁の有無の比較により、LvaE の伝搬特性に及ぼす擁壁の影響を見たものである。なお、

横軸は加振源中央からの水平距離である。同図より、擁壁直後の予測地点では擁壁の有無による差が生じているが、他の予測地点では差が生じていない。

ここには図示していないが、舗装が無い場合について擁壁の有無が  $L_{vaE}$  の伝搬特性に及ぼす影響を調べた結果がある。それによれば、擁壁直後の予測地点で 10.8dB の差が生じており、影響は約 25m まで続いている。これより、舗装がある場合でも擁壁による振動遮断を予想していたが、この例ではほとんど差が生じていない。舗装によって加振力が分散されることによるものと推測するが、擁壁による振動遮断については他の道路構造でも擁壁が使われる可能性があることから、そのメカニズムは今後の課題としたい。

図-25 は、RTV-2003 による  $L_{vaE}$  の距離減衰をシミュレーション結果と比較したものである。ただ、RTV-2003 の計算に当たっては距離の取り方が問題となるが、ここでは擁壁以遠の予測地点までの水平距離に単純に高さを加えた地表面距離を伝搬距離としている。図示に当たっては、シミュレーションの場合に合わせて、壁の高さを無視して予測地点までの水平距離を横軸としている。同図より、シミュレーションと RTV-2003 による  $L_{vaE}$  の距離減衰の差は、他の道路構造における差と同様の傾向になっている。地盤の内部減衰係数は他の道路構造の場合と同じ  $\alpha=0.02$  としたが、参考のため  $\alpha=0.01$  の結果も示しておく。内部減衰係数を小さくするとシミュレーション結果に近付くが、シミュレーションで仮定した減衰定数や伝搬距離の取り方などに関連するため、ここでは  $\alpha$  は簡単には決められない。

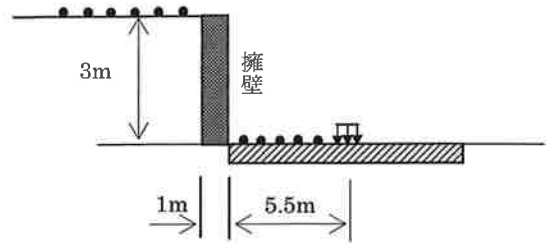


図-23 片側擁壁道路の解析モデル

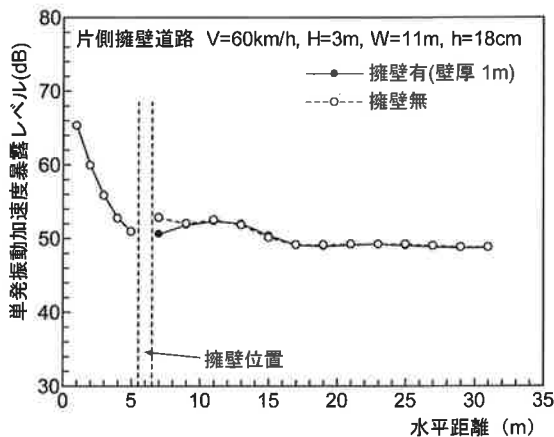


図-24 擁壁の有無が距離減衰に及ぼす影響

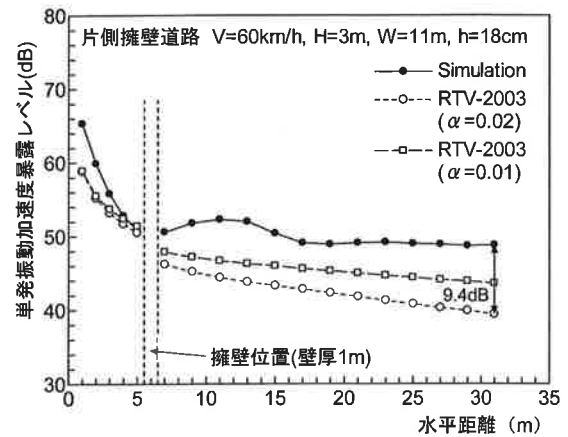


図-25 RTV-2003 の適用性

## 8. RTV-2003 を盛土・切土道路へ拡張するための方針

3章～7章における検討結果を踏まえて、盛土・切土道路への RTV-2003 の拡張に関する方針を以下にまとめる。

- (1) 道路縦断方向の範囲は、予測地点から車線中央に下した垂線の交点を中心に、左右に振動加速度レベルが各予測地点のユニットパターンの最大値から 20dB 小さくなるレベルまでの距離とする。また、時間間隔は、0.1 秒程度で十分であるとする。
- (2) 距離減衰式には、15m まで実体波、それ以遠は表面波とする RTV-2003 の考え方をそのまま用いる。また、伝搬経路については、これまでのシミュレーションによる検討経過も踏まえて、盛土道路、切土道路ともに地表面に沿って伝搬するものとする。
- (3) 指向性は取り除いた方が良く考えるが、 $L_{v10}$  に換算した計算値と実測値の対比によって RTV-2003 の検証が行われているため、慎重な検討が必要である。ただ、 $L_{v10}$  の計算値と実測値の間には不確定要因による差異があるとしていることから、指向性の導入が差異の要因になっている可能性や、定数項の調整で見直しできないか検討する。
- (4) 盛土・切土道路へ RTV-2003 を拡張した予測法を提案した文献 3) で導入している回折減衰は、平面との行路差によ

る距離減衰となっているが、その考え方は物理的に明確ではないことから、回折減衰は導入しない。

- (5) 掘割道路では、直立擁壁の存在が地盤振動の伝搬特性にほとんど影響していないことが分かった。また、RTV-2003によって計算した距離減衰も概ね適合しており、掘割道路への RTV-2003 予測法の拡張も含めることができると考える。

9. 今後の課題として舗装幅と加振源の走行位置の影響

図-26 に示す舗装モデルにおいて、舗装幅と加振源の走行位置の検討を行った。図-26a)は加振源が舗装の中央を走行する場合で、舗装幅が W=11m の場合を CaseA, W=21m の場合を CaseC とする。また、図-26b)は舗装端から 2.5m 内側を加振源が走行する場合で W=11m の場合を CaseB, W=21m の場合を CaseD とする。参考のため、W=21m の場合で舗装端から 5.5m 内側を加振源が走行する場合を CaseE として計算した。

図-27 は、舗装幅が W=11m の場合について、加振源の走行位置が単発振動加速度暴露レベル (LvaE) の距離減衰に及ぼす影響を調べたものである。Case B の距離減衰曲線が CaseA の場合よりも上方に移っているが、これは CaseB の場合、波動が舗装を伝わる距離が短くなるため舗装から地盤へ伝わる際の減衰が小さくなったものと考えられる。

図-28 は、舗装幅が W=21m の場合について、加振源の走行位置の影響を調べたものである。CaseD の加振源の走行位置が CaseB と同じ位置 (舗装端から 2.5m) であることによると考えられるが、CaseD の距離減衰曲線は CaseB の減衰曲線に一致している。同様に、CaseE の走行位置は舗装端から見れば CaseA の同じ位置になっており、CaseA の距離減衰曲線にほとんど一致している。CaseC の場合は、舗装を伝わる距離が長くなるため、舗装部での距離減衰が大きい。

これらの結果は、加振源の走行位置が周辺の地盤振動に影響を及ぼすことを示しており、多車線を取り扱う場合には車線補正を考える必要があることを示唆している。ただ、現状では実測による知見が得られていないため、現行の RTV-2003 予測法はそのまま運用し、将来的には実測データの収集等による検討を行う必要があると考える。

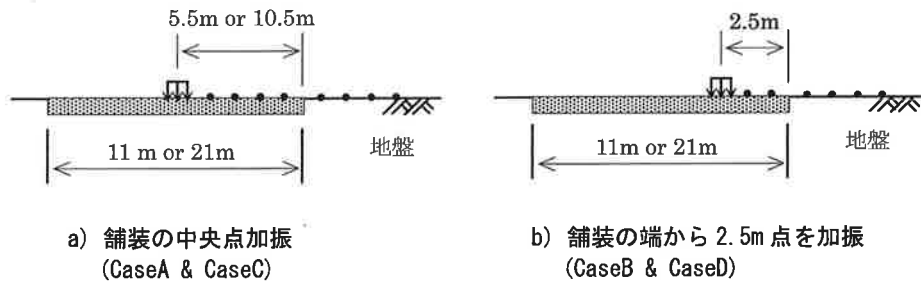


図-26 舗装幅、加振源走行位置の検討モデル

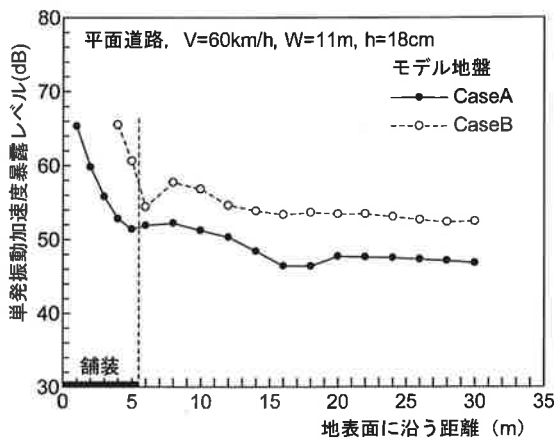


図-27 走行位置と LvaE の距離減衰 (W=11m)

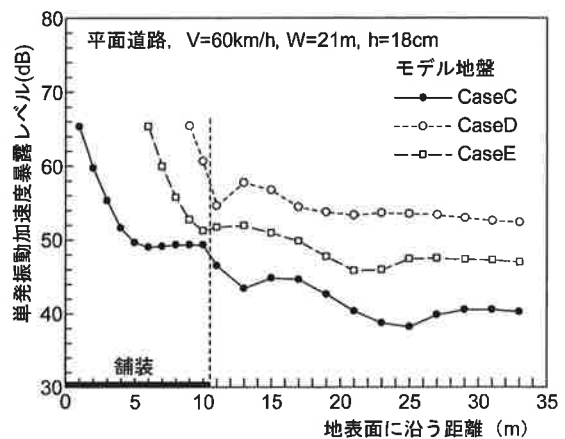


図-28 走行位置と LvaE の距離減衰 (W=21m)

## あとがき

平面道路に対する RTV-2003 予測法では、基準点の振動加速度レベルは実測データの統計処理によって求めており、等価振動加速度レベル ( $L_{vaeq}$ ) は実測値の  $L_{v10}$  との対比によって検証されている。RTV-2003 を盛土・切土道路へ拡張する場合、平面道路に対する RTV-2003 を文献 3) のように経験に基づいて拡張し、実測データで検証する方法が考えられるが、実測データを入手することは極めて難しい。このため、本報告ではシミュレーション法を活用して盛土・切土道路への拡張を検討することとした。

手順として、RTV-2003 による  $L_{vaE}$  が平面道路に対してシミュレーションした  $L_{vaE}$  と概ね整合することを確認し、これを踏まえて RTV-2003 の拡張を考え、この考え方が盛土・切土道路で通用することをシミュレーションによって確かめるといった手法を用いた。本報告は限られた条件での検討結果であるが、平面道路に対する RTV-2003 予測法を盛土・切土道路へ拡張できるかについては、8 章に述べた方針のもとにその可能性は十分であると考えている。

## 謝 辞

日本騒音制御工学会道路交通振動予測式作成分科会に数回に分けて提出した検討資料に対して分科会委員から貴重なご意見を頂いた。このご意見を踏まえて、新たに論理展開を構築して本報告を作成したことを記し、分科会の委員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・佐野泰之：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) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

## 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  | 産業技術総合研究所 (客員研究員)，工学博士，振動工学 |
| 内田 季延 | 飛鳥建設株式会社技術研究所，修士 (工学)，環境工学  |
| 平尾 善裕 | 小林理学研究所，博士 (工学)，環境工学        |