

切土構造における騒音減衰の予測手法

Prediction Method for the Sound Pressure Level Reduced by a Depressed Road

長谷部正基 By Masaki Hasebe*

金安公造 Kozo Kaneyasu* *

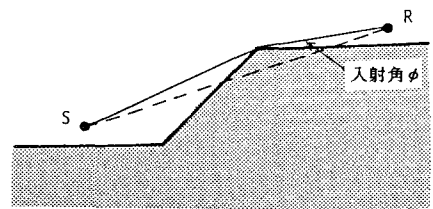
Propagation of sound wave over depressed road is treated from a theoretical point of view. The theoretical model on the propagation of spherical sound waves over depressed road with a finite acoustic impedance is to a large extent verified by indoor and field measurements over different types of ground surfaces. The results show good agreement with the predicted values. Based upon the theoretical model, a comparatively simple model for easy calculation is derived as an approximation.

1. まえがき

道路計画上において道路交通騒音を制御する方法としては、音源対策の他には自動車から放射された騒音の伝搬経路途中に遮音壁を設置したり、切土、盛土のような地形の特徴を生かした道路構造によって騒音の回折減衰をおこさせ、それによるレベルの低下を利用する方法が主要なものである。

現在、環境アセスメントで利用されている騒音推定手法は、日本音響学会による予測式¹⁾を用いたものであり、一般にはこの手法が騒音公害防止を考慮したものとして道路設計においても利用さ

れている。



図(1-1) 切土構造での騒音の回折減衰

その記述の中で切土構造に関する計算法は、遮音壁による回折減衰量の計算手法を拡張したものとして、図(1-1)のように音源から予測点に至る行路差を用いて算出されるとされている。またそこでは地表面吸収の影響についても言及されており、現段階では補正値を与えることは困

* 正会員 北海道大学助手 工学部衛生工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 北海道大学教授 工学部衛生工学科
(同上)

難であり、結局遮音壁と同じ減衰量が算出される。

しかしながら、切土構造には後に述べるように騒音防止の効果上、大きな利点が明らかであり、この手法を早急に改善すべきであると考えられる。

遮音壁によって騒音の低減を計る事はすでに一般的に行われており、その減衰量の推定方法は、点音源に対する前川の図表²⁾が広く利用されている。また、その遮音壁が立つ地表面の音響的特性の影響は近年、井清³⁾によって理論的な研究が成された。

遮音壁をくさび型の構造体の頂角が無限に小さい板状のものと考えると、その頂角が有限の場合が切土や盛土の場合に対応する。このくさび型の構造体(ウェッジ(Wedge))に音波が入射し、回折する現象は、多くの研究者によって調べられて来たが、それらの大部分はウェッジの表面が完全反射性の場合についてのものであり、また近似解として表面が不完全反射性の場合について提案された方法も切土底面の取り扱いに難点がある。

そこで本研究では、その表面が有限な音響インピーダンスを有する切土構造での、点音源から放射された音の回折減衰を計算する手法を明らかにし、またさらにその簡便な算出手法についても検討した。

2. 点音源に対する切土構造による騒音減衰計算

切土構造付近での騒音の伝搬を考察する場合、切土構造を構成する地表面上の音響特性に起因する超過減衰と、切土構造のエッジ部に起因する回折現象である。これらの現象を考慮して理論的に検討を行えば、受信点における騒音減衰量を正しく予測出来ると考えて、新しい切土構造による騒音減衰量を推定するための予測方法の検討を行った。

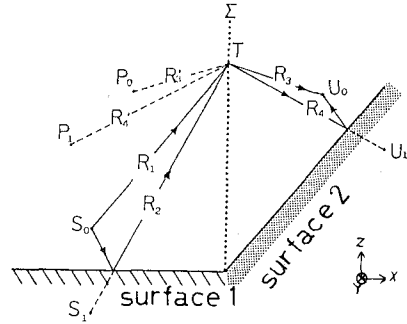
基本的計算理論

2-1 半無限の2平面が交差している場合

第一段階として、2平面が交差し、それらの各平面上に点音源と受信点が配置されている場合に、受信点での速度ポテンシャルを求める方法を明らかにする。図(2-1)に、切土構造を構成す

る2平面が交差する2つの部分を示している。

これらの面は各々特有の音響インピーダンスを持つものと仮定されている。



図(2-1) 切土構造を構成する2平面が交差する場合

平坦な地表面上における受信点での速度ポテンシャル Φ が地表面の有限な音響インピーダンスを考慮にいれて計算できるため、この問題を図(2-1)の仮想的な境界面 Σ において速度ポテンシャル Φ を与える Dirichlet 問題としてとらえる。

その境界面 Σ での速度ポテンシャルを与えるためには、点音源 S から放射された音の直接伝達波のみでなく、地表面による反射波も考慮する。このように、仮想的な境界面、すなわち境界面 Σ を設定して回折現象を取り扱ったのは、Thomasson⁴⁾やRasmussen⁵⁾による研究があるが、それらの研究においては、Rayleighの仮定を基にする方法が用いられている。しかし本研究ではGreen関数の考え方をを用いて検討する。

境界面 Σ で速度ポテンシャル Φ を与える Dirichlet 問題であるので、その場合に適当なGreen関数は、境界条件

$$G(r|r') = 0 \quad (2-1-1)$$

$$r' : \Sigma \text{ 上}$$

を満たすものである。境界面 Σ を $x=0$ の面とすると、この条件に適当な Green関数は r_m を r' の Σ に対する鏡像、また $G'(r|r')$ を境界面 Σ が存在しない場合の Green関数として、

$$G(r|r') = G'(r|r') -$$

$$G'(r_m | r') \quad (2-1-2)$$

で与えられる。

この Green関数を用いると、受音点Rでの速度ポテンシャル $\Phi(R)$ が

$$\Phi(R) = \int_{\Sigma} \{-\Phi(r_0) n \cdot \nabla G(R | r_0) \} d\sigma \quad (2-1-3)$$

で表せる。ここで積分は境界面 Σ 上で行い、また $\Phi(r_0)$ はその境界面上での速度ポテンシャルである。

次に境界面 Σ 上での速度ポテンシャル $\Phi(r_0)$ は、

$$\Phi(r_0) = \frac{e^{ikR_1}}{4\pi R_1} + Q \frac{e^{ikR_2}}{4\pi R_2} \quad (2-1-4)$$

で与えられる。ここで Q は球面波音圧反射率であり、図(2-1)中の surface 1 によるものである。

境界面 Σ 上に音源が存在する場合の Green関数 $G'(R | r)$ は、

$$G'(R | r) = \frac{e^{ikR_3}}{4\pi R_3} + Q \frac{e^{ikR_4}}{4\pi R_4} \quad (2-1-5)$$

で与えられる。ここで Q は、図(2-1)中の surface 2 によるものである。図(2-1)に示しているように受音点または虚受音点の、境界面 Σ に対する鏡像を考慮に入ると、

$$G'(R_m | r) = \frac{e^{ikR_{3,m}}}{4\pi R_{3,m}} + Q \frac{e^{ikR_{4,m}}}{4\pi R_{4,m}} \quad (2-1-6)$$

これらの基本的な Green関数を使うと、求める Green関数は、

$$G(R | r) = G'(R | r) - G'(R_m | r) \quad (2-1-7)$$

で与えられる。

式(2-1-2)で利用するのは、この Green関数の gradient: $\nabla G(R | r)$ であるので、球面波音圧反射率 Q が X -方向に関して大きく変化しないという仮定のもとに計算すると、結果は

$$\begin{aligned} \nabla G(R | r_0) = & 2(ik-1/R_3) \frac{e^{ikR_3}}{4\pi R_3^2} x_R \\ & + 2Q(ik-1/R_4) \frac{e^{ikR_4}}{4\pi R_4^2} x_R \end{aligned}$$

$$(2-1-8)$$

で与えられる。

これらの式(2-1-4) また式(2-1-8) を式(2-1-3)に代入すると、

$$\begin{aligned} \Phi(R) = & 2 \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \left[\frac{e^{ikR_1}}{4\pi R_1} + Q \frac{e^{ikR_2}}{4\pi R_2} \right] \\ & \times [(ik-1/R_3) \frac{e^{ikR_3}}{4\pi R_3^2} x_R \\ & + Q(ik-1/R_4) \frac{e^{ikR_4}}{4\pi R_4^2} x_R] dy dz \quad (2-1-9) \end{aligned}$$

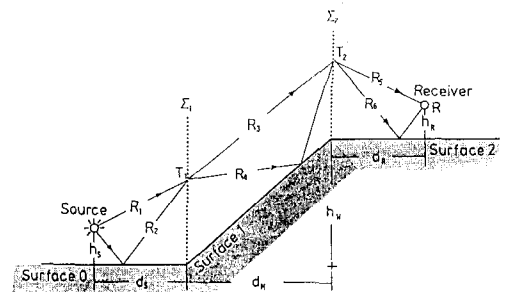
となる。

2-2 3枚の平面により切土構造が構成されている場合

半無限の2平面が交差している場合の計算手法を基本にして、3枚の平面により切土構造が構成されている場合の計算手法を検討する。図(2-2)に示しているように仮想的な境界面 Σ_1 、 Σ_2 を設定すると、境界面 Σ_2 上での速度ポテンシャル $\Phi(r_2)$ は、2-1-1での方法を用いて

$$\begin{aligned} \Phi(r_2) = & \int_{\Sigma_1} \{-\Phi(r_1) n \cdot \\ & \nabla G_1(r_2 | r_1)\} d\sigma \quad (2-2-1) \end{aligned}$$

で与えられる。



図(2-2) 切土構造での計算モデル
これを、受音点Rでの速度ポテンシャルを表す式、

$$\Phi(R) = \int_{\Sigma_2} \{-\Phi(r_2) \\ n \cdot \nabla G_2(R|r_2)\} d\sigma \quad (2-2-2)$$

に代入すると、

$$\Phi(R) = \int_{\Sigma_2} \int_{\Sigma_1} \{\Phi(r_1) n \cdot \nabla G_1(r_2|r_1) \\ n \cdot \nabla G_2(R|r_2)\} d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (2-2-3)$$

となる。ここで面積分は境界面 Σ_1 及び Σ_2 上で、 $\Phi(r_1)$ は境界面 Σ_1 上での速度ポテンシャルである。次に境界面 Σ_1 での速度ポテンシャル $\Phi(r_1)$ は、

$$\Phi(r_1) = \frac{e^{ikR_1}}{4\pi R_1} + Q_2 \frac{e^{ikR_2}}{4\pi R_2} \quad (2-2-4)$$

で与えられる。ここで Q_i ($i=2, 4, 6$) は球面波音圧反射率であり、それぞれ、図(2-2)中の surface 0, surface 1, surface 2 に対応しており、以上の手法で受音点 R での速度ポテンシャル $\Phi(R)$ が求められる。

2-3 近似計算手法

式(2-2-3)を直接に数値積分するためには、多大な時間を要する。このためこの計算手法を実用的なものにするために、実際に受け入れ得る仮定を基に近似を行い、定常位相法 (Method of Stationary Phase)⁶⁾ の方法を用いて数値積分の計算時間を大幅に減少させる。結局、受音点での速度ポテンシャル Φ は、

$$\Phi(R) = -ik \frac{x_n x_R}{8\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \sum_{i=1}^2 \sum_{j=3}^4 \sum_{k=5}^6 \\ \times Q_{i2} Q_{j4} Q_{k6} \\ \frac{e^{ik(R_i+R_j+R_k)}}{e} \\ \times \left[\frac{R_i^2 R_j^2 R_k^2 (R_i+R_j) (a_s R_j R_k + a_n R_k R_i + R_i R_j)}{\{R_i^2 R_j^2 R_k^2 (R_i+R_j) (a_s R_j R_k + a_n R_k R_i + R_i R_j)\}^{1/2}} \right] \\ \times d z_1 d z_2$$

但し、 $Q_{mn} = Q_m$ ($m=n$)

$Q_{mn} = 1$ ($m \neq n$)

$$a_s = (d_s / (d_s + d_n))^2, \quad a_n = (d_n / (d_s + d_n))^2 \quad (2-3-2)$$

となる。

この積分は、高さ方向 (z の正の方向) について 0 から ∞ まで行っているが、数値積分を行

う場合には、有限の高さ z_{max} までとなる。また、積分の間隔 Δz も有限な大ききでなければならない。すなわち、実際に数値積分を実行できる形式としては、

$$\Phi(R) = -ik \frac{x_n x_R}{8\pi^2} \sum_{i=1}^{l_{max}} \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{j=3}^4 \sum_{k=5}^6 \\ \frac{e^{ik(R_i+R_j+R_k)}}{e} \\ \times \left[\frac{R_i^2 R_j^2 R_k^2 (R_i+R_j) (a_s R_j R_k + a_n R_k R_i + R_i R_j)}{\{R_i^2 R_j^2 R_k^2 (R_i+R_j) (a_s R_j R_k + a_n R_k R_i + R_i R_j)\}^{1/2}} \right] \\ \times Q_{i2} Q_{j4} Q_{k6} \Delta z_1 \Delta z_2 \quad (2-3-3)$$

となる。

本研究では積分する際、 $\Delta z = 0.2\lambda$ としたが、コンピュータの実働時間を最小にするために z_{max} を小さく抑え、積分に及ぼす $z \sim z_{max}$ 付近の影響が大きくなる。このため、 l_{max} 、 m_{max} より 10 小さい l 、 m の値から被積分関数 I_0 に重みづけを行い、

$$I = I_0 (l_{max}-1) (m_{max}-m) / ((l_{max}-10) \\ (m_{max}-10)) \quad (2-3-4)$$

として数値積分を行った。

3. 点音源に対する切土構造による騒音減衰量の実験的考察

2. で切土構造付近での騒音の伝搬特性を考察した。ここでは、戸外、また戸内において実験的研究を行い、その結果と理論的検討結果を比較する。戸外においては、実際に使用されている切土構造をもつ道路付近において実験を行った。

また戸内においては、無響室内に縮小模型を設置し、実験を行った。

音源としては、ホーンドライバユニットに内径 0.02 m、長さ 0.8 m のステンレスパイプを取り付け、その先端より球面波が発生するようにしたものを使用した。受音点側は、2 本のコンデンサーマイクロホンを用い、そのうち 1 本は参照用マイクロホン、もう 1 本は測定用マイクロホンとした。参照用マイクロホンは仮想的に自由音場内での音圧を推定するために用いた。無響室内における実験では、縮小模型などの、主に合板によって作製された構造物が無響室内に存在

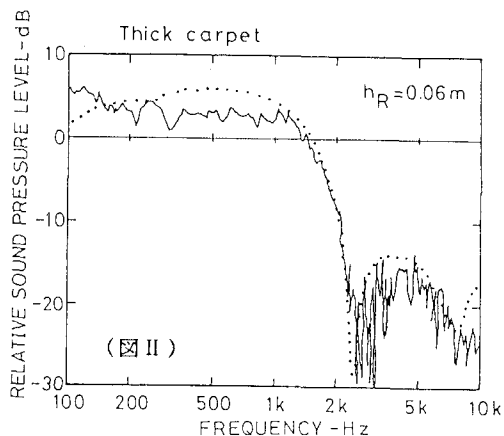
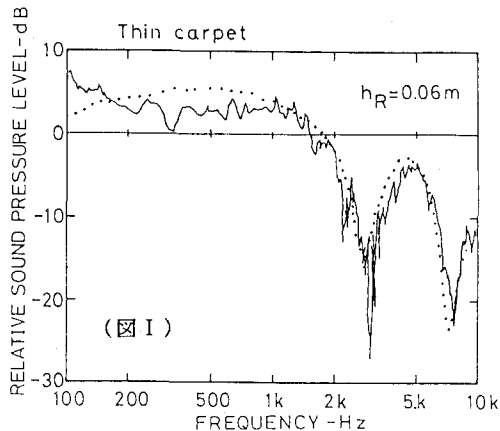
しない状態で、測定点での音圧のスペクトル分布を測定し、自由音場内での音圧のスペクトル分布とした。戸外における実験では、音源に近い位置（ステンレスパイプの開口部より0.1m離れた位置）での音圧のスペクトル分布を測定し、距離減衰効果を補正することによる外挿を行って自由音場内での音圧のスペクトル分布とした。

3-1 実験結果及びその考察

3-1-1 無響室内での縮小模型実験結果

無響室内の模型は9mm厚の合板で作製され、実験条件により、surface 1 及び surface 2（図（2-2）を参照）に、2種類のカーペットを敷き、吸音性の表面とした。2種類のカーペットのうち、1種は比較的薄いパンチカーペットであり、薄いゴム質の材料で裏打ちされている。また、もう1種は比較的厚いカーペットで、硬く織られた麻状の織物で裏打ちされている。この構造から、これらのカーペットを、硬い面で裏打ちされた、内部に層構造を持つ平面とみなすことにした。

これらのカーペットの表面の音響インピーダンスを求めるため、Delany ら⁷⁾の実験式による通気抵抗の値と、カーペットの厚さ⁸⁾を推定した。切土模型での実験結果は図（3-1）に示している。受音点の高さ h_R は0.06mと0.14mの2種とし、切土表面の音響特性を、表面を覆うカーペットを替えることで変化した。また surface 0 は実際の切土構造ではアスファルト面であり、完全反射面と考え、通気抵抗 $\sigma = 30000$ cgs rayls/cm で表した。



$$h_s = 0.05, d_s = 0.13, d_m = 0.35, d_F = 0.4,$$

$$h_u = 0.3m.$$

surface 1 と surface 2 の通気抵抗 σ 及びカーペットの厚さ L ; $\sigma = 1500$,

$$L = 0.002 \text{ (図 I)}, \sigma = 300, L = 0.007$$

(図 II) 点線が計算結果

図（3-1）無響室内での縮小模型実験結果及び計算結果

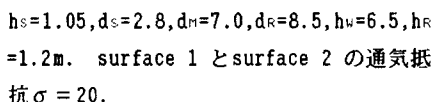
3-2-2 戸外での実験結果

実際の切土構造において本研究における手法が適用出来るかどうかを検討するために、実際に供用されている切土構造をもつ道路において実験を行った。実験用の音源は、12面体の表面に直径16cmのスピーカーユニットを取り付けたものを使用した。実験した結果を図（3-2）に示す。

これらの実験結果と本研究に於て明らかにされた新しい手法による計算結果は何れも良い一致を示している。

4. 切土構造による騒音減衰量を求めるための簡易手法

以上で切土構造での騒音の回折減衰の理論的検討が行われ、それは実測結果によって裏付けられた。しかしながらこの手法を実際に利用しようとするれば、一般には計算が面倒なこと、また計算時間が必要なことなどで、利用し易い方法とは言えない。



図(3-2) 戸外での実験結果及び計算結果

本研究においても、切土構造による騒音の回折減衰に関する理論的、実験的研究がなされたが一般には利用し易いものでは無かった。そこで以上の検討結果を基に、現場技術者にも利用価値が高い、簡便な計算方法を提案する。

実用的、すなわち簡便に計算結果を得られる手法を考案するため、近似的に切土構造による騒音の回折減衰はつぎの3つの要素によって起こると

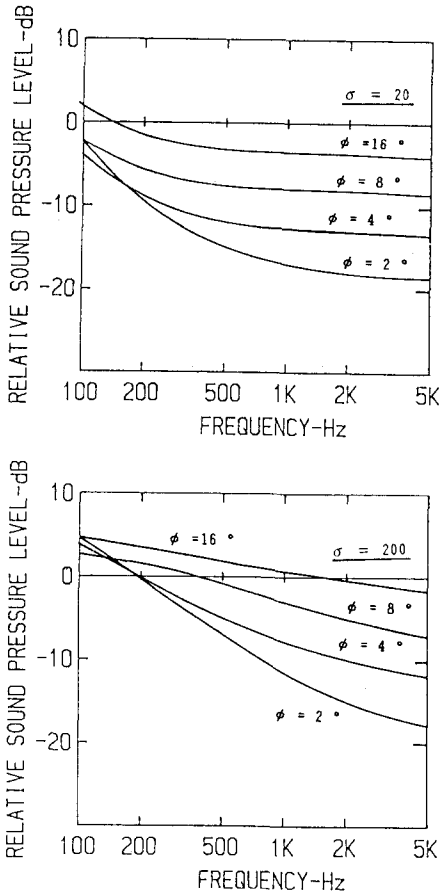
- 以上の3つの要素に分類出来、減衰量は各要素に起因する減衰量との和で与えられると考える。以下に、それらの要素のおおのについて検討する。

本研究で採用した切土構造での騒音伝搬の計算方法は図(2-2)に示したように仮想的な半平面を2枚考え、Green関数の考え方をういた方法である。例えば第2の仮想面 Σ_2 と受音点Rの関係を考えると仮想面上の点における境界値が、一種の細分化された作用として受音点Rの場に影響を与え、その関係を表現するものがGreen関数を用いた積分表現であると考えることが出来る。

但し、反射係数 Q は平面波に対する反射係数で近似することにした。これは実際にこの手法が利用される場合の切土構造の寸法が十分大きいことを考慮にいれることに依った。すなわち、反射係数 Q は、

で表される。ここで β は音響アドミッタンスである。その結果を切土構造を構成する地表面上を騒音が擦過することによって起こる超過減衰の値として、図(4-1)に示す。地表面の性状と通気抵抗 σ の関係は、Embleton⁹⁾によって示されているが本手法では、深い草地を $\sigma=20$ 、草丈の短い芝地を $\sigma=200$ 、アスファルト面を

$\sigma=30000$ rays/cm で表すことにする。この超過減衰の簡略計算は、切土構造を構成するのり面及び上平面の両方に対して適用され、実際に利用するときは、この図から超過減衰値を読み取る。



図(4-1) 地表面上を騒音が擦過することによって起こる超過減衰

4-1-2 切土構造のエッジ部での回折に起因する減衰の取り扱い

エッジ部での騒音の回折による減衰の値は、Fresnel - Kirchhoff の近似理論を適用し、エッジ部上の開放面での Fresnel 積分によって表されると考えた。

しかし、この Fresnel 積分も直接的に計算する事は簡単ではないので、前川の実験曲線を数式表示するために使われている式を利用して次の式を

採用した。

$$\Delta L_{diff} = 20 \log_{10} \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} + 5 \quad (4-1-2)$$

4-1-3 音源の存在する面での音の反射の取り扱い

音源の存在する面(図(2-2)の surface 0)での音の反射は、図(3-2)の計算結果、また実験結果によって示されているように、結果に微細構造を造る。本研究における大きな目的が道路構造に関するものであることによって、アスファルト面を想定しているために、微細構造はするどい dip となだらかな peak を示す。しかし、騒音制御の測定方法として一般に利用されている周波数分析方法は1/3オクターブフィルターを用いたものであることを考えると、この多数の peak と dip による影響を全て正確に考慮する事は実際上不必要である。

4-2 簡略化した手法による全減衰量の算出

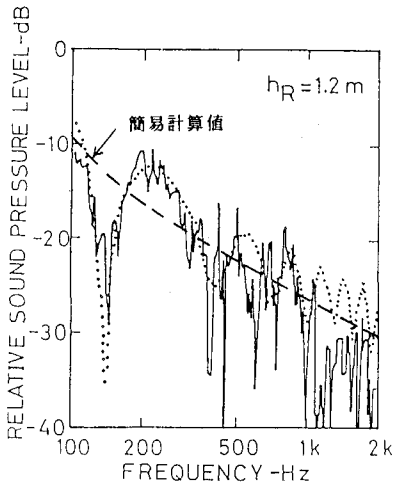
4-1で明らかにした手法によって全減衰量は次の式で算出される。

$$\Delta L_{tot} = \Delta L_{diff} + \Delta L_{exs} + \Delta L_{exR} \quad (4-1-5)$$

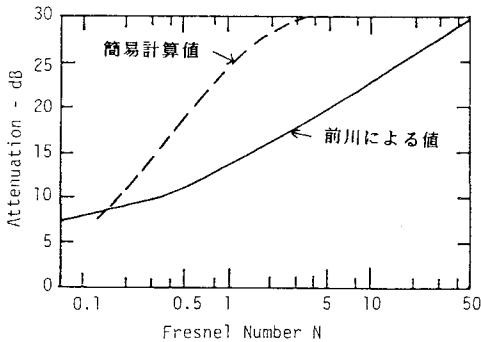
ここで、

- ΔL_{tot} : 簡略化した手法による全減衰量
- ΔL_{diff} : エッジ部での騒音の回折による減衰
- ΔL_{exs} : 音源側の地表面上を騒音が擦過することによって起こる超過減衰
- ΔL_{exR} : 受音点側の地表面上を騒音が擦過することによって起こる超過減衰

この手法を用いて計算した結果と、前章で明らかにした手法によって計算した結果との比較対照を図(4-2)に示す。また遮音壁による減衰計算値との比較を Fresnel 数 N をパラメーターとして、図(4-3)に示す。



図(4-2) 簡略計算及び前章の手法での計算結果



図(4-3) 遮音壁の計算を切土に応用した場合の計算結果と、本研究による簡易計算結果

5. 結論

切土構造における騒音の回折減衰を検討し、地表面の音響インピーダンスも考慮に入れて計算可能なことを示した。また、その簡易な計算手法も明らかにした。図(4-3)に示されているように、騒音公害防止の点からみると道路構造として切土構造を用いることは有効な方法である。

【参考文献】

- 1) 石井聖光：“道路交通騒音予測計算方法に関する研究(その1)”，日本音響学会誌31巻

(1975)507-517

- 2) 前川純一：“障壁(堀)の遮音設計に関する実験的研究”，日本音響学会誌18巻(1962)187-196
- 3) 井清武広：“地表面の影響を考慮に入れた遮音壁の騒音減衰設計に関する研究”，公害資源研究所報告第17号。
- 4) S.I.Thomasson：“Diffraction by a screen above an impedance boundary,” J. Acoust. Soc. Am., vol.63, No.6(1978) 1768-1781.
- 5) K.B.Rasmussen, “A note on the calculation of Sound propagation over impedance jumps and screens,” J.Sound Vib. 84(1982) 598-602.
- 6) E.Skudrzyk, “The Foundations of Acoustics,” Springer-Verlag, New York (1971).
- 7) M.Delany and E.N.Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials,” App'ied Acoustics, 3(1970)105-116.
- 8) M.Hasebe, “Acoustic wave propagation along a snow surface,” J.Acoust.Soc.Jpn.(E), 6 (1985)265-270.
- 9) T.F.W.Embleton, J.E.Piercy and G.A.Daigle, “Effective flow resistivity of ground surfaces determined by acoustical measurements,” J.Acoust.Soc.Am, 74(1983) 1239-1243.