

モンテカルロシミュレーションによる多次反射を伴う 道路2層構造の簡易騒音計算法と騒音特性

西山 均¹・西山 文男²

¹正会員 博士(工学) 富士技研センター株式会社 (〒150 東京都渋谷区東1-22-11渋谷三信ビル6F)

²フェロー会員 富士技研センター株式会社 (〒150 東京都渋谷区東1-22-11渋谷三信ビル6F)

著者らはモンテカルロ法による単位角度当たりのエネルギー密度が一定の音源を設定し、道路2層構造の反射面の境界条件のもと幾何音響的に多数の反射を繰り返させ、予測点でのエネルギーを積分するシミュレーション方法を提案する。また、このシミュレーションによる結果を基に、予測位置での反射影響係数を定義し、従来の音響学会式に加えて反射騒音を定量的に考慮した簡易騒音計算法を示す。この方法によれば、高架橋、遮音壁、路面の位置関係、桁形状、周囲の地形、吸音材の配置位置等について包括した反射モデル形成による評価が容易に可能であり、道路2層構造での騒音計算法として有効であると考えられる。

Key Words : road traffic noise, elevated tracks, multi reflection, reflective noise, Monte Carlo simulation.

1. まえがき

近年の新規道路整備事業では、沿道地域への自動車騒音の影響を十分考慮し、環境基準など高いレベルの環境目標値を満足するよう遮音対策が施されているものが多い。遮音効果としては、一般的に回折減衰を多く期待するため、沿道に設置される遮音壁の規模、高さは年々大きくなる傾向にある。一方、都市圏の道路用地の有効活用から、自動車専用道路と一般国道などが並行して建設される場合も多くなってきている。このとき道路形式として、中央部に高架構造の自動車専用道路、高架下に一般国道などが配置されるいわゆる道路2層構造が多く採用されつつある。遮音壁による騒音対策の計画、設計は現在のところ、環境アセスメント時にいわゆる音響学会式(ASJ Model 1975)による推定、予測計算により行われるのが一般的である¹⁾。しかし、ASJ Model 1975では、このような道路2層構造に対する計算方法が具体的に示されていない。このため、通常は一般的な平面、盛土、切り土、高架道路の計算値を重ね合わせることで計算が行われていることが多い。しかしながら、この結果供用後予測した値よりもはるかに大きな騒音レベルがこの道路2層構造の沿道で観測され、苦情が発生する問題が生じている。これは定性的には、高架下の一般部の道路騒音が専用部の桁、床版に反射し、沿道の住宅

に達することが原因となっている。特に遮音壁が高くなり、直接音の回折減衰が増加し、回折音よりも桁下反射音が卓越するような場合に大きな問題となると思われる。

このような道路構造の環境対策において、設計段階で騒音対策方法を策定するには有効な予測手法が必要となる。道路2層構造の反射音の解析法としては、今井らが示した鏡面反射を使ったシミュレーション計算が示されている²⁾。この方法は映像音源を設定し、反射騒音を計算するものであり、実用上有効な方法と考えられるが、桁構造はフラットに制限され反射回数も2~3次程度が現実的な制限となると考えられる。一方、1桁構造に関しては、色々な研究があり、一般には拡散反射で扱うことが多い。Andersonは実測から求めた独自の回帰式を使って評価法を示している³⁾。しかし、この方法は実測値による経験式であるので、その適用範囲はかなり制限を受けるものと考えられる。福島らはランベルのコサイン則を適用し、実験値などの比較を行い有効な評価法を与えている^{4)~6)}。文献4),5)によれば、乱反射を仮定した高架橋1次裏面反射音の予測モデルを提示し、道路交通騒音の整合性を得ている。また、文献6)によれば、高次の反射音を考慮したモデルを提示し、ピストル音に対する計算値と実測値の整合性を得ている。しかしながら、この文献では道路交通騒音の高次反射に対する妥当性は確認されていない。このモデルでは、桁

と道路面は平行であるという仮定を設けており、また、桁と路面以外の反射面（例えば遮音壁など）のモデル化は為されていない。一方、最近のコンピューターハードウェア、ソフトウェアの進歩により、境界要素法によるシミュレーションが研究対象として注目されている⁷⁾。これは、モデルに任意の形状や音響特性を与えて騒音を波動的に求めることができる大きな利点がある。また、境界面のみを要素化すれば良いため、有限要素法に比べて遙かにモデルの規模を小さくできる特質を有している。しかし、現実の道路構造のように解析する空間が大きなものは境界要素法による解析でも計算にかかる労力は非常に大きなものとなり、実際の現場での騒音予測計算に用いるには難しい問題があると考えられる。

波動方程式を解く方法に比べると今井ら、Anderson、福島らの方法は遙かに容易であり、予測計算を実用上行うにあたっては現実性が高い。しかしながら、一種の半閉鎖空間である実際の2層構造内の音の反射は、桁や床版などの1次反射のみで表現される部分は少なく、実際には桁、路面、遮音壁の間を多数反射して、非常に複雑な反射経路を持って予測点側に到達するのが現実であると考えられる。今井、Andersonの方法では2~3次反射程度までの考慮が計算実行上有効な計算範囲と考えられ、それ以上の反射経路を考慮した計算は計算過程が非常に複雑になる傾向にある。一方、福島らの方法は高次反射の考慮が原理上可能であるが、遮音壁や複雑な道路断面形状に対する対応などが困難となる場合が考えられる。

この様な背景から、著者らは単位角度当たりのエネルギー密度が一定の音源を設定し、音源から放出される音の放出角度をモンテカルロ法による確率変数とした。そして、道路2層構造の反射面の境界条件のもと幾何音響的に多数の反射を繰り返させ、予測点でのエネルギーを積分するシミュレーション方法を提案する。また、このシミュレーションによる結果を基に、予測位置での反射影響係数を定義し、従来の音響学会式に加えて反射騒音を定量的に考慮した簡易騒音計算法を示す。この方法は実際の道路2層構造沿道の騒音実測値による比較により妥当性を得ている。この方法によれば、高架橋、遮音壁、路面の位置関係、桁形状、周囲の地形、吸音材の配置位置等について包括した反射モデル形成による評価が容易に可能であり、道路2層構造での騒音計算法として有効であると考えられる。さらに、本論文ではこの簡易騒音計算法を用い一般部に遮音壁を有する標準的な道路2層構造の騒音特性について考察した。その結果、一般部に高い遮音壁を有する道路2層構造の反射騒音は回折騒音に比べて遙かに高く、騒音レベルは反射騒音により支配されることが分かった。ま

た、回折減衰を稼ぐため、遮音壁の位置をより音源側に近づけた方が有利であるという従来の概念と相反し、受音点側に遮音壁を近づけたほうが全体の騒音レベルは遙かに減少することが分かった。これは道路2層構造の騒音レベルを決定する反射騒音がこのような傾向を示すからである。

2. 騒音反射のモンテカルロシミュレーション

道路2層構造下の騒音反射のモンテカルロシミュレーションについて言及する。本論文では道路方向にその断面形状が変化しないものとし、Fig.1(a)の様な高架橋桁と左右遮音壁及び路面で構成される2次元の道路断面モデルを考える。Fig.1(a)においてASJ Model 1975による音源の設定と同様に路面より30[cm]の位置に高架橋下を走行する一般部上下線車両による騒音を2つの線音源として S_1, S_2 で設定する。また、予測点Oとして公民境界地上高1.2[m]点を設定する。反射騒音は一般部の音が専用部桁下の半閉鎖空間で反射するものとし、専用部の音源は無視する（但し、回折音については考慮する）。 S_1, S_2 各々の音源のパワー P_{0,S_1}, P_{0,S_2} [W]は単位量を与えるものとし、本計算では $P_0^* = P_{0,S_1} = P_{0,S_2} = 1.0$ [W]を設定する。

Fig.1(a)右上は1つの音源の拡大図である。ここに示すように、それぞれ1つの音源より全周方向に音の拡散が生じるものとし、その単位角度当たりのエネルギーは一定と仮定する。本方法では音を幾何音響的に扱い、モンテカルロ法により k 番目に設定される音源位置での音をベクトル表示し以下で与えるものとする。以降、このベクトル量 \vec{D} を便宜的に音束と称することとする。

$$\vec{D}_{0,k} = (\phi_{0,k}, P_{0,k}), (k=1-N) \quad (1)$$

ここに、 $\phi_{0,k}$ [rad]は k 番目に放出される音束 $\vec{D}_{0,k}$ のX軸からの角度であり、 $0-2\pi$ [rad]の間の一様乱数である。また、 $P_{0,k}$ [W]は1つの音束のパワーレベルであり、以下で与えられる。

$$P_{0,k} = \frac{P_0^*}{N} = \text{const [W]} \quad (2)$$

ここに N はモンテカルロ法により発生させる音束の数であ

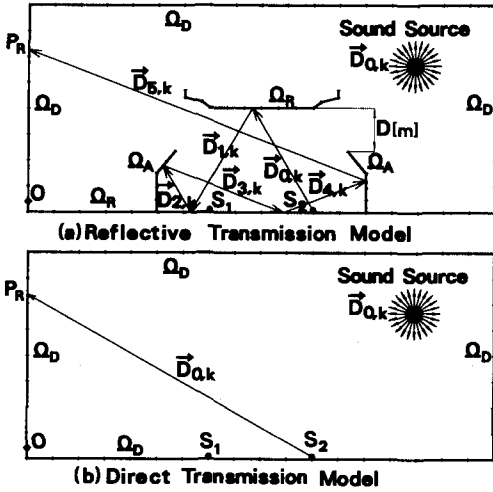


Fig.1 Models for Monte Carlo simulation

る。Fig.1(a)は道路2層構造の音の反射面を M_R 個の境界要素 $\Omega_j(j=1\sim M_R)$ で構成したものである。 j 番目の境界要素 Ω_j には、その始点座標 (X_s, Y_s) と終点座標 (X_e, Y_e) 及び反射係数 Q_j を設定する。設定する境界条件は概ね以下の様に3つのタイプに分けられると考えられる。

- Ω_R : 高反射型境界条件 → 桁, 床版, 路面など
- Ω_A : 吸収型境界条件 → 裏面吸音板など
- Ω_D : 検出境界条件 → 完全吸収, 予測点の境界

反射係数 Q_j は厳密には周波数による複素変数で表現されるが、本簡易計算法では波動性を無視しているため、実数定数値で簡単に定義する。構成される主な境界面のうち、桁, 床版, 路面などの高反射型境界条件は表面の状態などにより変化するため、厳格な設定はかなり難しいが、基本的には完全反射に近い性質であるので $Q=1.0$ に近い値を設定するものとする。一方、遮音壁の吸音板, 裏面吸音板などの吸収型境界条件は残響室法吸音率, 斜め反射吸音率などで80-90[%]の吸音率の規格を有しているものが多いので、反射係数としては $Q=0.1\sim 0.2$ 程度を設定する。また、予測位置に設けられる検出境界条件は、解析の原理より完全吸収 $Q=0.0$ に設定される。

本計算法で考える反射境界面での条件は鏡面反射であ

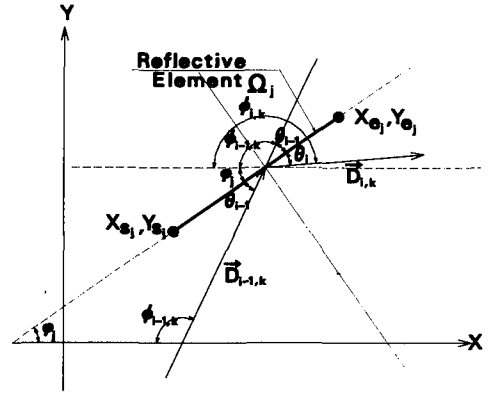


Fig.2 Condition on reflective surface

る。Fig.2は反射境界 Ω_j 上での音束 \vec{D} の反射境界条件の詳細を示したものである。音源位置より発した音束は、原理的には無限に反射を繰り返して減衰して行く。ここで、 i 番目の反射後の音束を $\vec{D}_{i,k}=(\phi_{i,k}, P_{i,k})$ としたとき、境界要素 Ω_j で i 番目の反射における境界条件は、次の漸化式によって表現できる。

$$P_{i,k} = Q_j P_{i-1,k} \quad (\text{on } \Omega_j) \quad [W] \quad (3)$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} = \pi - \phi_{i-1,k} - \phi_j \quad [rad] \quad (4)$$

$$\phi_j = \tan^{-1} \left| \frac{Y_e - Y_s}{X_e - X_s} \right|, \quad (\text{on } \Omega_j) \quad [rad] \quad (5)$$

$$\phi_{i,k} = 2\pi - \phi_{i-1,k} - 2\phi_j \quad (\text{on } \Omega_j) \quad [rad] \quad (6)$$

ここに $\theta_{i-1}, \theta_i [rad]$ は音束の反射境界要素に対する入射角と反射角、 $\phi_j [rad]$ は反射境界要素のX軸に対する角度である。式(3)は反射前後の音束のエネルギーの反射境界条件であり、式(4)は音束の入射角と反射角が等しいという条件、式(6)は反射前後の音束のX軸からの角度 $\phi_{i-1,k}, \phi_{i,k} [rad]$ を示す漸化式である。また、 k 番目の音束が Ω_j の境界要素で i 番目の反射によって消費されるエネルギー $\Delta P_{i,j,k} [W]$ は以下で示される。

$$\begin{aligned} \Delta P_{ij,k} &= P_{i-1,k} - P_{i,k} \\ &= P_{i-1,k} - Q_j P_{i-1,k} = (1-Q_j) P_{i-1,k} \quad (\text{on } \Omega_j) \quad [W] \quad (7) \end{aligned}$$

原理的には無限の繰り返し反射の後、1つの音源に対し*j*番目の境界要素 Ω_j で消費される全エネルギー $\bar{P}_{R_j}[W]$ は、

$$\begin{aligned} \bar{P}_{R_j} &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N \Delta P_{ij,k} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N (1-Q_j) P_{i-1,k} \quad (\text{on } \Omega_j) \quad [W] \quad (8) \end{aligned}$$

で表される。実際の数値計算上の条件では1つの音束 $\bar{D}_{i,k}$ のエネルギー値 $P_{i,k}[W]$ が音源位置での値 $P_{0,k}[W]$ の1/1000程度以下になったら終了するように設定している。

次に、Fig.1(b)の様に高架橋桁や遮音壁などの反射境界条件がない、いわゆる直接伝搬のモデルを考慮する。同様な方法により、このモデルの反射境界要素で消費される音束の騒音エネルギー $\bar{P}_{F_j}[W]$ を以下の式で算出する。

$$\bar{P}_{F_j} = \sum_{k=1}^N P_{0,k} \quad (\text{on } \Omega_j) \quad [W] \quad (9)$$

但し、このモデルでは、全ての境界要素は反射係数 $Q=0.0$ の検出境界条件であり、完全吸収を設定するので、反射は生じず直接吸収される。1つの音源による反射伝搬モデル (Fig.1(a)) の直接伝搬モデル (Fig.1(b)) に対する同じ検出境界位置で相対応する境界 Ω_j での影響比を反射影響係数 η_j として以下のように定義する。

$$\eta_j = \frac{\bar{P}_{R_j}}{\bar{P}_{F_j}} \quad (\text{on } \Omega_j) \quad (10)$$

一方、1つの音源の初期位置での全エネルギー量 $P_0^*[W]$ と全ての反射境界によって消費されたエネルギーはエネルギー保存の法則より等しく、また、反射伝搬、直接伝搬モデルとも全エネルギー量は等しく以下の式がなりたつ。

$$P_0^* = \sum_{j=1}^{M_R} \bar{P}_{R_j} = \sum_{j=1}^{M_F} \bar{P}_{F_j} = 1.0 \quad [W] \quad (11)$$

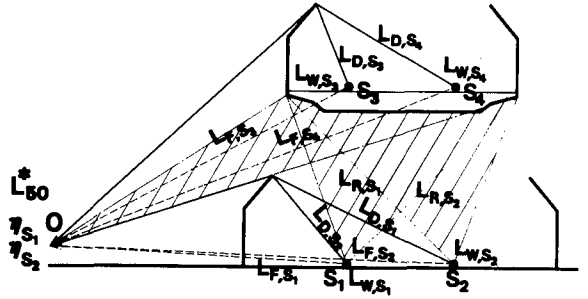


Fig.3 Model for noise transmissions

シミュレーションは2つの音源 S_1, S_2 について上述した手法により2回独立して計算を行う。その結果得られるそれぞれの音源 S_1, S_2 に対する予測点 O を含む反射境界要素 Ω_j での反射影響係数を η_{S_1}, η_{S_2} で設定する。

3. 反射を考慮した時間率騒音レベルの中央値の計算法

本簡易計算法ではASJ Model 1975に式(10)に示す予測点位置での反射影響係数 η_{S_1}, η_{S_2} を考慮し、時間率騒音レベルの中央値 $L_{50}^*[dB]$ の予測方法を示す。Fig.3は道路2層構造の騒音伝搬ルートを模式的に示したモデル図である。一般部の音源として S_1, S_2 、専用部の音源として S_3, S_4 を設定する。予測地点で回折減衰なく距離減衰のみにより、直接伝搬される騒音レベル $L_{F,S_i}[dB]$ ($i'=1-4$)はASJ Model 1975により以下の式で算定できる¹⁾。

$$L_{F,S_i'} = L_{W,S_i'} - 8 - 20 \log_{10} l_{S_i'} + 10 \log_{10} \left(\frac{\pi l_{S_i'}}{d_{S_i'}} \tanh \frac{2\pi l_{S_i'}}{d_{S_i'}} \right) [dB] \quad (12)$$

ここに、 $l_{S_i'}[m]$ は音源 S_i' から予測点 O までの距離、 $d_{S_i'}[m]$ は音源 S_i' を走行する車両の平均車頭間隔である。 $L_{W,S_i'}[dB]$ は各々の音源 S_i' の騒音パワーレベルで、例えば第2段階規制式では以下で与えられる。

$$L_{W,S_i'} = 86 + 0.2 V_{S_i'} + 10 \log_{10} (a_{1,S_i'} + 5 a_{2,S_i'}) \quad (13)$$

ここに V_{s_i} [m/sec] は平均自動車走行速度、 a_{1,s_i} は小型車混入率、 a_{2,s_i} は大型車混入率である。一方、音源 S_i に対する予測地点で遮音壁を考慮した回折騒音 L_{D,s_i} [dB] の騒音レベルは、

$$L_{D,s_i} = L_{F,s_i} + \alpha_{D,s_i} + \alpha_{L,s_i} \quad [dB] \quad (14)$$

で求められる¹⁾。ここに、 α_{D,s_i} 、 α_{L,s_i} [dB] は ASJ Model 1975 の回折減衰及び道路形状の種々の要因による補正值である。よって、全体の回折騒音 L_D^* [dB] は、以下で与えられる。

$$L_D^* = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{D,s_1}}{10}} + 10^{\frac{L_{D,s_2}}{10}} + 10^{\frac{L_{D,s_3}}{10}} + 10^{\frac{L_{D,s_4}}{10}} \right) \quad [dB] \quad (15)$$

一方、音源 S_1, S_2 による予測点位置での反射騒音レベル L_{R,s_1}, L_{R,s_2} [dB] は前節で示した反射影響係数 η_{s_1}, η_{s_2} に直接伝搬での騒音レベル L_{F,s_1}, L_{F,s_2} [dB] を考慮し、以下の式によって算出する。

$$L_{R,s_1} = 10 \log_{10} (\eta_{s_1} \cdot 10^{\frac{L_{F,s_1}}{10}}) = L_{F,s_1} + 10 \log_{10} \eta_{s_1} \quad [dB]$$

$$L_{R,s_2} = 10 \log_{10} (\eta_{s_2} \cdot 10^{\frac{L_{F,s_2}}{10}}) = L_{F,s_2} + 10 \log_{10} \eta_{s_2} \quad [dB] \quad (16)$$

よって、音源 S_1, S_2 を考慮した全体の反射騒音レベル L_R [dB] は以下で与えられる。

$$L_R = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{R,s_1}}{10}} + 10^{\frac{L_{R,s_2}}{10}} \right) \quad [dB] \quad (17)$$

以上より、回折と反射を考慮した予測地点での騒音レベルの中央値は、

$$L_{50} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_D^*}{10}} + 10^{\frac{L_R}{10}} \right) \quad [dB] \quad (18)$$

で与えられる。式(18)によって反射騒音の考慮が可能となり、道路2層構造についても比較的実測騒音レベルと計算

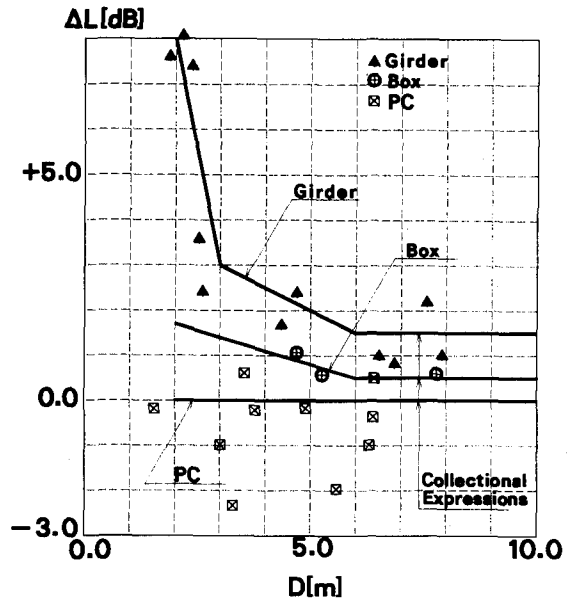


Fig.4 Computing error against opening D [m]

値とは良く一致する様になる。しかしながら、本簡易計算法においては、音を幾何音響的な鏡面反射の取扱いをしているため音の波動性は考慮されていない。従って、複雑な桁形状の構造では、拡散反射の影響が現れ計算値は実測値に比べて小さくなる傾向にある。また、特に桁下フランジ下面より遮音壁天端までの距離、即ち、桁下開口量 D [m] が小さくなるとその影響はより顕著になる。Fig.4は高架橋にPC箱桁、鋼箱桁、鋼板桁を用いた道路2層構造のいくつかの実測断面での、桁下開口量 D [m] に対する本簡易計算法による計算誤差 $\Delta L = (\bar{L}_{50} - L_{50})$ [dB] を示したものである。ここに、 \bar{L}_{50} [dB] は実測騒音レベルである。本簡易計算法では、より適用範囲を広げるためFig.4の結果より拡散反射による補正值 α_R [dB] を以下のように各桁タイプごとに桁下開口量 D [m] を関数として設定する。

(PC箱桁など桁下面が全体的に平面な桁の場合)

$$\alpha_R = 0.0 [dB] \quad (2.0 \leq D [m]) \quad (19)$$

(鋼箱桁など桁下面に平面と複雑な部分がある桁の場合)

$$\alpha_R = 0.5 [dB] \quad (6.0 \leq D [m]) \quad (20)$$

$$\alpha_R = -\frac{3}{10} D + 2.3 [dB] \quad (2.0 \leq D < 6.0 [m]) \quad (21)$$

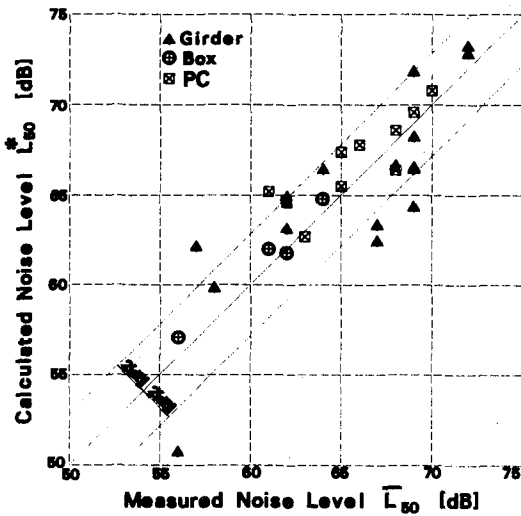


Fig.5 Numerical values against measured data

(鋼鈹桁など桁下全体が複雑な桁の場合)

$$\alpha_R = 1.5[dB] \quad (6.0 \leq D[m]) \quad (22)$$

$$\alpha_R = -0.5D + 4.5[dB] \quad (3.0 \leq D < 6.0[m]) \quad (23)$$

$$\alpha_R = -5D + 18[dB] \quad (2.0 \leq D < 3.0[m]) \quad (24)$$

Fig.4の実線は各桁タイプごと、それぞれの補正式の値をプロットしたものである。現在のところ、 $\alpha_R[dB]$ については実測値の数が十分と言えないため、最適であるとはいえない。今後より多くの比較を行い信頼性を向上させる必要があるといえる。また、本簡易計算法の計算過程を拡散反射を考慮した方法に改良することが1つの解決法となると考えられる。以上より、 $\alpha_R[dB]$ による補正を考慮した反射騒音レベル $L_R^*[dB]$ は以下の式で与える。

$$L_R^* = L_R + \alpha_R[dB] \quad (25)$$

よって、拡散反射、拡散放射の補正を考慮した予測地点での騒音レベルの中央値 $L_{50}^*[dB]$ は、

$$L_{50}^* = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_D^*}{10}} + 10^{\frac{L_R^*}{10}} \right) [dB] \quad (26)$$

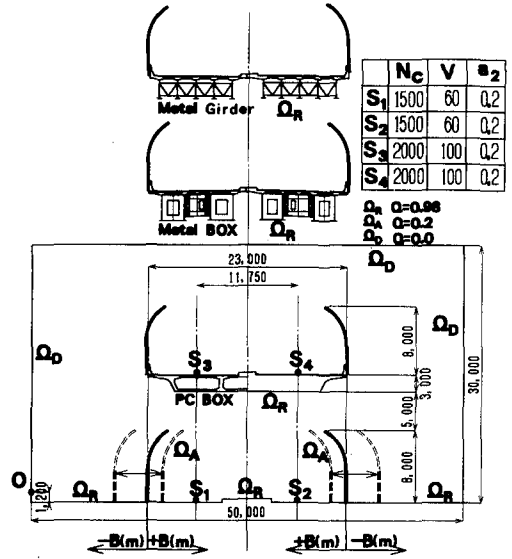


Fig.6 Examples for elevated tracks

で与えられる。Fig.5は横軸に実測値 $\bar{L}_{50}[dB]$ と縦軸に $\alpha_R[dB]$ による補正後の計算値 $L_{50}^*[dB]$ をプロットした相関図であり、各桁タイプとも両者は良く一致する様になることがわかる。

計算結果と実測値を比較した結果得られた補正值 $\alpha_R[dB]$ を評価すると、PC箱桁など桁下面が全体的に平面な場合には鏡面反射の仮定が有効であり、 $\alpha_R = 0.0[dB]$ と補正は必要としないが、鋼桁のように桁下面の構造が複雑なものになると拡散反射の効果が影響するため幾分補正が必要となる。特に開口量 $D[m]$ が小さくなると拡散反射の効果に加え、開口部からの拡散放射の影響が大きくなり補正量はかなり大きくなる必要がある。Fig.5の相関図は一定の道路2層構造の断面ではなく、かなり変化のある道路断面を多く選んでいるため補正值 $\alpha_R[dB]$ を含め本簡易計算法の妥当性は一応比較的広範囲に保たれていると考えられるが、任意の道路2層構造で適用が可能であるという確証は得られていない。特に開口量 $D[m]$ が非常に小さい場合には、開口より波動性を伴った拡散放射が生じるという見かたをしたほうが現実と一致しており、本簡易計算法の適用範囲を超える一つの要因と考えられる。

4. 反射騒音を伴う道路2層構造の騒音特性

次に一般部に遮音壁を伴った標準的な道路2層構造に本解析手法を適用し、その騒音特性について考察する。Fig.

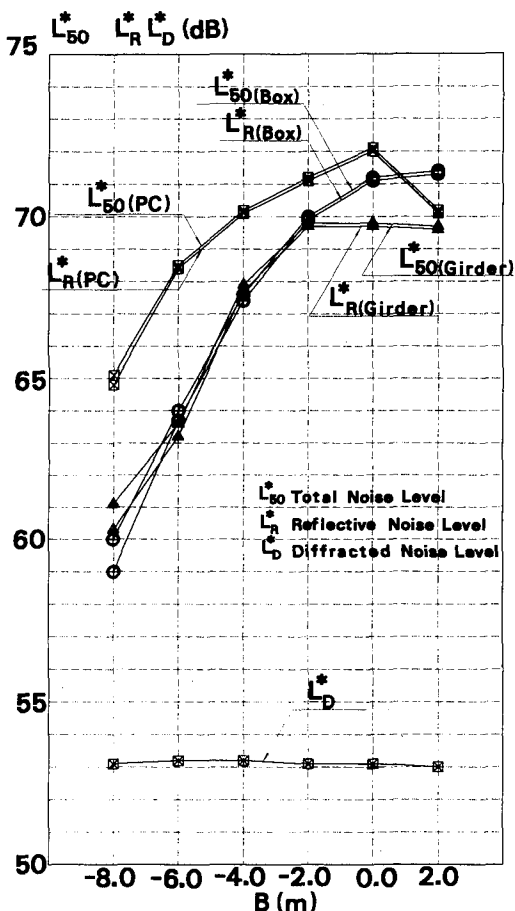


Fig.7 Numerical Values of noise level against $B[m]$

6には解析する道路2層構造のモデル例を示す。桁構造としては、鋼鉄桁、鋼箱桁、PC箱桁を設定し、一般部遮音壁高さは $8.0[m]$ に設定している。また、遮音壁天端から下フランジまでの距離及び下フランジから専用部路面までの高さは、各桁構造とも同一に $D=5.0, h_1=3.0[m]$ に設定している。音源として一般部上下車線道路中心に2つ、専用部上下道路中心に2つ考慮する。一般部音源 S_1, S_2 として1時間当たりの車両通過台数 $N_c=1500$ [台]、走行速度 $V=60[km/h]$ 、大型車混入率 $a_2=0.2$ を設定する。同様に、専用部音源 S_3, S_4 として1時間当たりの車両通過台数 $N_c=2000$ [台]、走行速度 $V=100[km/h]$ 、大型車混入率 $a_2=0.2$ を設定する。また、それぞれの桁と路面 Ω_R の反射係数は $Q=0.98$ 、遮音壁 Ω_A は $Q=0.2$ に、公民境界位置に検出境界 Ω_D を設定した。また、一般部遮音壁位置については、専用部遮音壁位置直下を $B=0[m]$ に、民地側を

負、道路側を正に設定し、前後に変化をさせて計算結果を評価する。

Fig.7には予測点 O である公民境界高さ $1.2m$ 地点での一般部回折騒音 $L_D^*[dB]$ 、反射騒音 $L_R^*[dB]$ 及び合成騒音 $L_{50}^*[dB]$ の本簡易計算法による計算値を縦軸に、遮音壁位置 $B[m]$ を横軸にとりプロットしたものである。この結果より、遮音壁を伴った道路2層構造については、反射騒音のレベルが回折音に比べて $7-18[dB]$ 程度高くなっている。従って、解析したような構造条件、交通条件では反射音によって騒音レベルは決定され、回折音のみの評価では全く実際の騒音レベルと合わなくなると考えられる。このことを実証する上で、反射騒音、回折騒音の分担について実測値により評価することが重要である。今回設定したモデルに類似した、ある高い遮音壁を伴った道路2層構造に対するインパルス応答による計測では、回折音に比べて反射騒音のパワースペクトルが道路交通騒音の主要周波数帯で $10-20[dB]$ 程度高いという結果が報告されており、本計算法の解析結果と適合している⁸⁾。

一方、騒音レベルは専用部桁位置、一般部遮音壁位置、受音点の相対位置関係に影響を受ける。一般部遮音壁位置を外側(民地側)に移動させると、騒音レベルは遙かに減少する。この状況では回折騒音は逆に行路差が減少するため僅かに増加して行く傾向にある。しかし、遮音壁を伴った道路2層構造では一般的に反射騒音は回折騒音に比べ遙かに大きい関係があるため、合成騒音は外側に遮音壁が位置する方がはるかに減少し有利となる。この結果は、従来の遮音壁はなるべる音源に近づけた方が良いという概念とは相反する現象である。上述の現象は、感覚的には予測点 O と遮音壁天端及び桁下でできる三角形のうち、予測点 O の見通し角度の大小が桁下反射音に関係していると考えられる。換言すれば、遮音壁を外側にするか、高くするかによって角度が減少しこれに伴い反射音の低減が図れると考えられる。また、桁構造による効果については、鋼鉄桁構造はPC箱桁構造に比べ、桁下構造が遙かに複雑であるため、桁内部での乱反射が生じ、平均約 $2-3[dB]$ 程度騒音レベルは小さくなる結果となっている。

5. まとめ

本論文では、モンテカルロ法による単位角度当たりのエネルギー密度が一定の音源を設定し、道路2層構造の反射面の境界条件のもと幾何音響的に多数の反射を繰り返えさせ、予測点でのエネルギーを積分するシミュレーション方

法を提案した。また、このシミュレーションによる結果を基に、予測位置での反射影響係数を定義し、従来の音響学会式に加えて反射騒音を定量的に考慮した簡易騒音計算法を示した。本論文の内容として、以下のような結果が得られた。

- ①この簡易計算法は実際の道路2層構造沿道の騒音実測値の比較による補正值 $\alpha_R[dB]$ を考慮することにより複雑な形状の桁の場合にも適用範囲を広げることができる。
- ②この方法によれば、高架橋、遮音壁、路面の位置関係、桁形状、周囲の地形、吸音材の配置位置等について包括したモデル評価が容易に可能である。
- ③反射モデルが鏡面反射を仮定しているので、開口率が小さくなると音の波動性による拡散放射の効果により、大きな補正係数の適用が必要となる。従って、この条件によっては適用範囲を超える場合があると考えられる。
- ④モンテカルロシミュレーションによる反射影響係数の算出については音の波動性は考慮されていないので、多重反射時の回折や干渉は考慮されていない。あくまでも、エネルギー保存の法則に従い各々の境界要素上でどれだけ音のエネルギーが消費されるかをシミュレーションしているものである。しかし、これら多重反射時の回折や干渉の影響は反射による影響に比べて遙かに小さいと考えられる。
- ⑤本簡易計算法で高い遮音壁を伴った標準的な道路2層構造を解析した結果、反射騒音は回折騒音に比べて約7~18[dB]程度も高く、騒音レベルは反射騒音により支配されることが分かった。
- ⑥高い遮音壁を伴った道路2層構造では、従来では回折減衰を稼ぐため、遮音壁の位置をより音源側に近づけた方が有利であるという概念と相反し、受音点側に遮音壁を近づけたほうが全体の騒音レベルは遙かに減少することが分かった。これは道路2層構造の騒音レベルを決定する反射騒音がこの様な傾向を示すからである。

本簡易計算法の今後の課題、研究問題として、以下に示す項目が挙げられる。

- ①より多くの実測結果と比較を行い、補正值 $\alpha_R[dB]$ を含め、全体の計算手法としての信頼性を向上させる。
- ②拡散反射を考慮した解析手法を取り入れ補正值 $\alpha_R[dB]$ の値を小さくする。

③インパルス応答計測などにより回折騒音、反射騒音の分離した計測を行い分担比率に対する計算法の検証を行う。

④開口量が極端に減少した場合の道路断面構造に対し、境界要素法など波動性を考慮した数値解析結果と比較することにより適用範囲を広げる。

⑤エネルギーベースの音響学会式(ASJ Model 1993)⁹⁾の等価騒音レベル $L_{Aeq}[dB]$ にこの反射影響係数を考慮し、騒音レベルの予測を行う方法を確立する。

⑥本簡易計算法により裏面吸音板などの反射対策に対する計算を行い低減効果について考察し、対策前後の実測値との比較より検証を行う。

参考文献

- 1) (社)日本音響学会：道路交通騒音の予測計算方法に関する研究報告書、1975年2月、1976年3月、1977年2月、1978年3月。
- 2) 今井 章久、今泉 信夫：簡易計算機シミュレーションを用いた高架道路裏面反射音の影響評価、東京都公害研究所年報、pp.209-215,1984年。
- 3) Anderson, G. : Noise studies for the San Antonio "Y" project, Transportation Research Record 983, 1-8(1984),USA.
- 4) Fukushima A., Itiki T., and Konishi K. : On traffic noise calculation methods about double decks road, Inter-Noise 94, Proceedings, pp.307-310(1994).
- 5) 福島 昭則、金治 英貞：乱反射を仮定した高架裏面反射音の予測モデル、日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集、1994年10月。
- 6) 福島 昭則、小西 一生：高次の反射音を考慮した高架裏面反射音の予測手法に関する研究、日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集、1995年9月。
- 7) 田村 政行：境界要素法による屋外騒音伝搬の予測、日本音響学会誌、48,pp.451-454, 1992年。
- 8) 日本道路公団 東京第二管理局 三郷管理事務所、(財)小林理学研究所、東京外環道川口地区 騒音解析調査 報告書 1995年3月。
- 9) (社)日本音響学会： L_{Aeq} による道路交通騒音予測、第5回音響技術セミナー、1996年10月。

(1996. 12. 19 受付)

AN EFFICIENT CALCULATION OF THE ROAD TRAFFIC NOISE WITH MULTI REFLECTION BY THE MONTE CARLO SIMULATION ALONG ELEVATED TRACKS

Hitoshi NISHIYAMA and Fumio NISHIYAMA

We will propose a simulation method wherein energy at a forecast point be integrated by repeating a lot of reflexes in a geometrical sound way under the boundary condition on reflex side on the elevated tracks via the Monte Carlo Method. Also, based on the result of this simulation, we denote brief calculation method of noise taking reflex noise into our consideration quantitatively by defining reflex effect co-efficiency at forecast site in addition to the former formulations of the Acoustical Society of Japan. This method easily makes evaluation by the formation of reflex model possible which had been taken in elevated bridges, sound insulation walls, relationship of road-side position, surrounding land shape, arrangement position of sound-absorbing materials.