

高架裏面反射音の予測モデル

神戸第一建設部 設計課 森 喜 仁
交通環境室 環境技術課 富 田 穰

.....

要 旨

高架道路が平面道路に併設されている箇所等での道路沿道では、直接音以外に高架裏面で反射する高架裏面反射音が到達するため、このような箇所での騒音予測は、直接音以外に高架裏面反射音を考慮して行う必要がある。今回は、現在提案されている高架裏面反射音の予測モデルを検討対象として、桁裏面形状による反射指向特性の検討および、平面道路にある遮音壁の遮蔽効果を簡便に計算できる予測モデルの検討を行った。検討の結果、実用的に妥当な高架裏面反射音の予測モデルとして、スリット法と散乱反射法を提案した。

キーワード：高架裏面反射音、予測モデル、エネルギーベース、線音源に対する遮蔽効果、多重反射

まえがき

阪神高速道路3号神戸線のように平面道路に高架道路が併設されている場合や高架道路が2層構造となっている場合には、自動車から直接道路沿道に到達する直接音以外に自動車からの騒音が高架裏面で反射して道路沿道に到達する高架裏面反射音が生じる。

高架裏面反射音の予測は、とりあえず最も簡便なスリット法を用いているのが現状であり、桁の裏面形状による反射指向特性や平面道路に設置された遮音壁の遮蔽効果の取り扱い方等については検討されていない。

今回は、まず桁の裏面形状による反射指向特性を検討し、次に遮音壁がある平面道路に高架道路が併設された箇所での検討を行い、実用的な高架裏面反射音予測モデルについて有用な結果を得たので報告する。

1. 高架裏面反射音予測モデルの概要

現在、高架裏面反射音を予測するモデルとして表-1に示すモデルが提案されている。^{1),2),3)} 本検討では、精緻に計算ができる波動を取り扱うモデルを基準モデル(回折理論、境界要素法)として、エネルギーを取り扱うモデル(スリット法、境界エネルギー積分法、散乱反射法)の妥当性を検討した。

2. 桁の裏面形状による反射指向特性

2-1 検討概要

桁の裏面形状による反射音の指向特性を把握し、桁裏面形状毎の反射指向特性について予測モデルの妥当性を検討した。検討対象とした桁の種類は、フラット桁、I桁、箱桁の3種類である。

波動を取り扱った予測モデルでの計算は、波動の干渉の影響を軽減させるため、250~1kHzの3オクターブバンドを対象周波数帯域とし、その帯域を27分割し1/9オクターブバンドの中心周

表-1 高架裏面反射音予測モデル

予測モデル	予測モデルの概要	計算対象
回折理論	平坦な面での反射は、音源の虚像からの有限幅の開口を伝搬する問題と等価であるため、一定幅の開口に回折理論を適用して計算。	波動での計算
境界要素法	音場の任意の点の音圧を、境界面からの寄与の積分より計算。波動方程式の積分表示式の数値計算。	波動での計算
スリット法	平坦な面での反射は、音源の虚像からの有限幅の開口を伝搬する問題と等価であり、回折についてのエネルギーの加減則が成り立つと仮定し計算。 (エネルギー場に関しBabinetの原理を仮定)	エネルギーでの計算
境界エネルギー積分法	散乱反射面で囲まれた音場内での音圧を、境界エネルギー積分方程式により計算。凹凸面での反射がLambertの余弦則に従うと仮定。多重反射を考慮。	エネルギーでの計算
散乱反射法	凹凸面での反射がLambertの余弦則に従うと仮定し計算。	エネルギーでの計算

波数で計算し、道路交通騒音のスペクトルを重み付けしてオーバーオール値を求めた。

エネルギーを取り扱った予測モデルでの計算は、250～1 kHzの1/1オクターブバンド中心周波数(250Hz, 500Hz, 1 kHz)で計算し、道路交通騒音のスペクトルを重み付けしてオーバーオール値を求めた。

音源は反射面の中心から15mの位置で、入射角(θ) 0° , 15° , 30° , 45° の4ケースを考え、受音点は反射面の中心から半径25mおよび50mの円弧状に $-89^\circ \sim +89^\circ$ まで 1° 間隔に配置した(図-1)。

2-2 フラット桁

(1) 検討対象予測モデル

反射音面が平坦な形状であるため、検討に用いた予測モデルは、回折理論(3次元)、境界要素法(2次元)、スリット法(3次元, 2次元)であり、

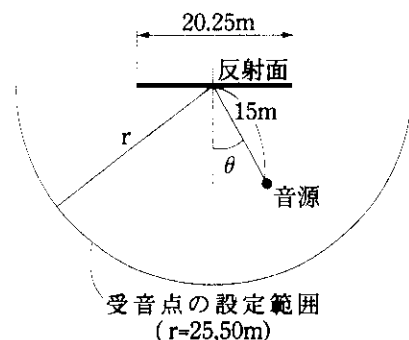


図-1 音源・反射面・受音点

回折理論および境界要素法の計算結果を基準としてスリット法の妥当性を検討した。

(2) 検討結果

回折理論(3次元)とスリット法(3次元)の比較検討では、平板である反射面が無限大としたときの反射音の音圧レベルを基準とした減衰量で計算結果を表示している。境界要素法(2次元)とスリット法(2次元)の比較検討では、 $-89^\circ \sim +89^\circ$ の受音範囲での反射音のエネルギーの総和を基準とした相対音圧レベルで計算結果を表示している。

図-2に示すように回折理論および境界要素法とスリット法の結果はよい一致をしている。したがって、道路交通騒音のような広帯域雑音ではエネルギー場におけるBabinetの原理が成り立つと考えられ、スリット法は妥当と考えられる。

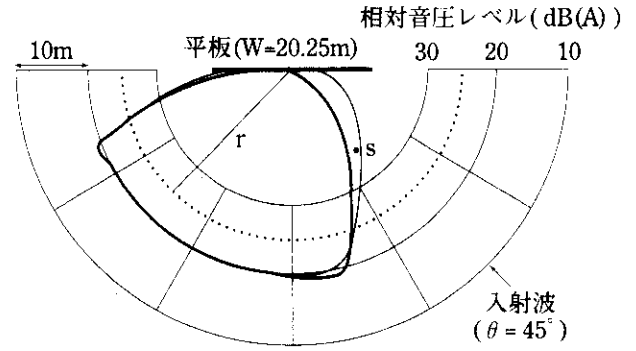
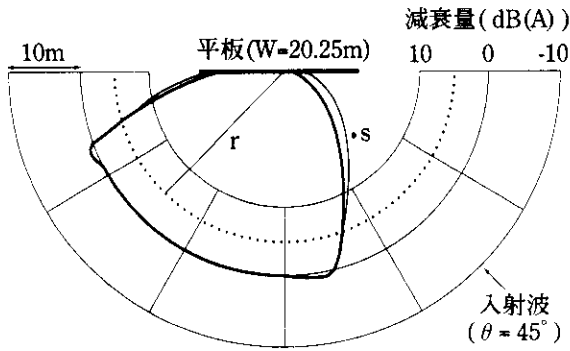
2-3 I桁

(1) 検討対象予測モデル

反射面が凹凸な形状であるため、検討に用いた予測モデルは、境界要素法(2次元)と散乱反射法(2次元)であり、境界要素法の計算値を基準として図-3に示すI桁での散乱反射法の妥当性を検討した。

(2) 検討結果

計算結果は、 $-89^\circ \sim +89^\circ$ の受音範囲での反射音の総和を基準とした相対音圧レベルで表示している。



— : 回折理論
 - - : スリット法
 : 受音点 (r=25m), S:音源

— : 境界要素法
 - - : スリット法
 : 受音点 (r=25m), S:音源

図-2 フラット桁での反射指向特性

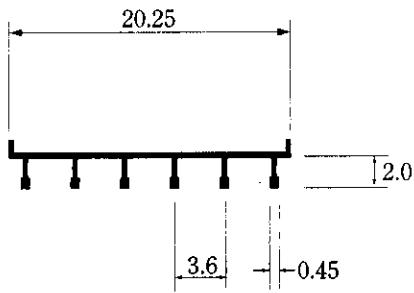
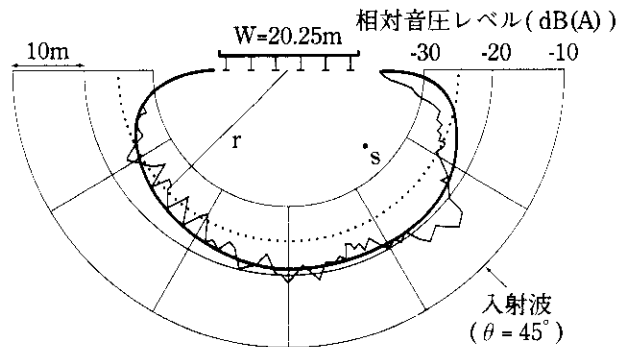


図-3 I桁の諸元 (m)



— : 境界要素法
 - - : 散乱反射法
 : 受音点 (r=25m), S:音源

図-4 I桁での反射指向特性

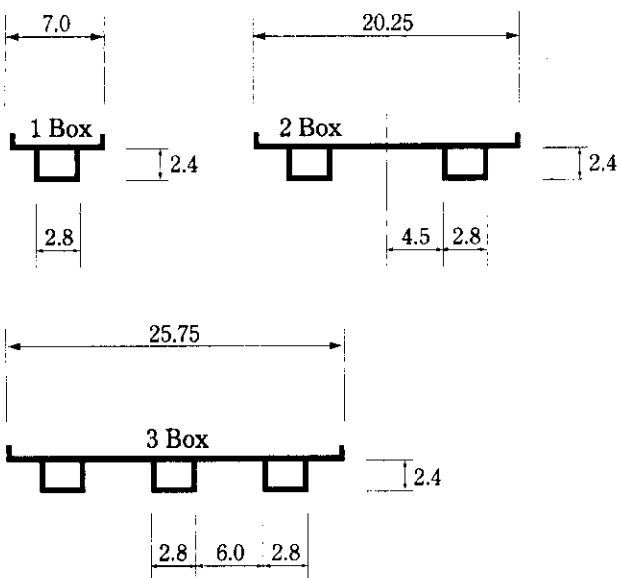


図-5 箱桁の諸元 (m)

2-4 箱桁

(1) 検討対象予測モデル

桁側面（腹板）の数により、平坦な反射面形状の反射指向特性から、凹凸な反射面形状の反射指向特性まで考えられるため、検討に用いた予測モデルは、境界要素法（2次元）、スリット法（2次元）および散乱反射法（2次元）である。本検討では、境界要素法の計算結果を基準として、図-5に示す箱桁でのスリット法と散乱反射法の妥当性を検討した。

1箱桁の検討は、桁側面の数が少なく反射指向特性が散乱的にならないと考えられたため、スリット法を妥当性の検討対象モデルとした。

図-4に示すとおり、境界要素法と散乱反射法の計算結果の差は、大部分が±5dBの範囲にありI桁の場合Lambertの余弦則を仮定することは妥当であると判断できる。

本検討でのスリット法の計算は、箱桁のドフランジ位置を反射面として計算した反射音と桁側面および床版面を反射面として計算した反射音を合

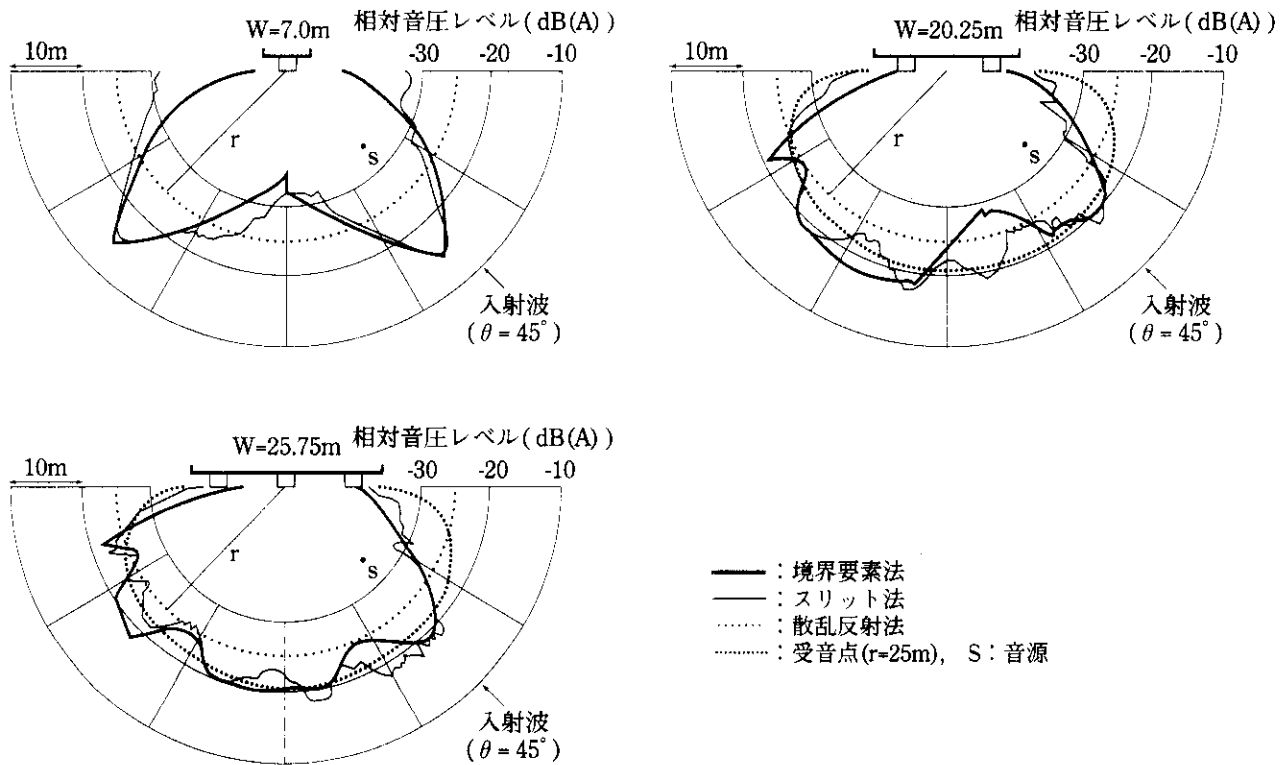


図-6 箱桁での反射指向特性

成することにより行った。桁側面および床版面を反射面とする計算は、桁側面と床版面の多重回折を扱うことになるが、今回の多重回折を適切に計算する方法がないため計算の簡便性を考慮して、本検討では各々の反射面スリットとした計算値のうち減衰量が大きくなる方を採用した。

(2) 検討結果

計算結果は、 $-89^\circ \sim +89^\circ$ の受音範囲での反射音の総和を基準とした相対音圧レベルで表示している。

図-6に示すように、1箱桁では、境界要素法とスリット法の計算結果はよく似た傾向を示している。

2箱桁では、スリット法は境界要素法の計算結果とよく似た傾向を示しており、散乱反射法と境界要素法の計算結果は、比較的よく似た傾向であるが、水平に近い角度での反射音が散乱反射法では大きくなる傾向にある。

3箱桁では、2箱桁の結果と同様の傾向にあるが、反射指向特性が2箱桁よりも散乱反射法に近くなっている。

3. 平面道路に遮音壁がある場合の検討

3-1 検討概要

平面道路に遮音壁が無い場合は、桁裏面形状による反射指向特性の検討結果から適切な予測モデルが判断できるが、平面道路に遮音壁がある場合は、遮音壁の遮蔽効果を含めて検討する必要がある。本検討では、桁裏面形状による反射指向特性の検討結果を踏まえ、その検討と同様の3種類の桁形状を用いて、図-7に示す平面道路に遮音壁がある場合の断面で予測モデルの妥当性を検討した。

今回の検討は、平面道路に遮音壁が設置されているため、スリット法を用いると高架裏面での回折と平面道路の遮音壁での回折を扱う2重回折を計算しなければならない。この2重回折を取り扱う適切な予測モデルがないため、回折計算は平面道路の遮音壁のみを扱えばよいLambertの余弦則にしたがう散乱反射を仮定した予測モデルを検討対象とした。

検討の手順は、まず桁の種類毎に境界要素法の計算結果を基準として境界エネルギー積分法の妥

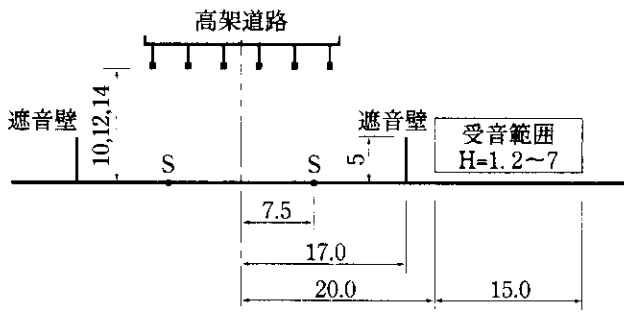
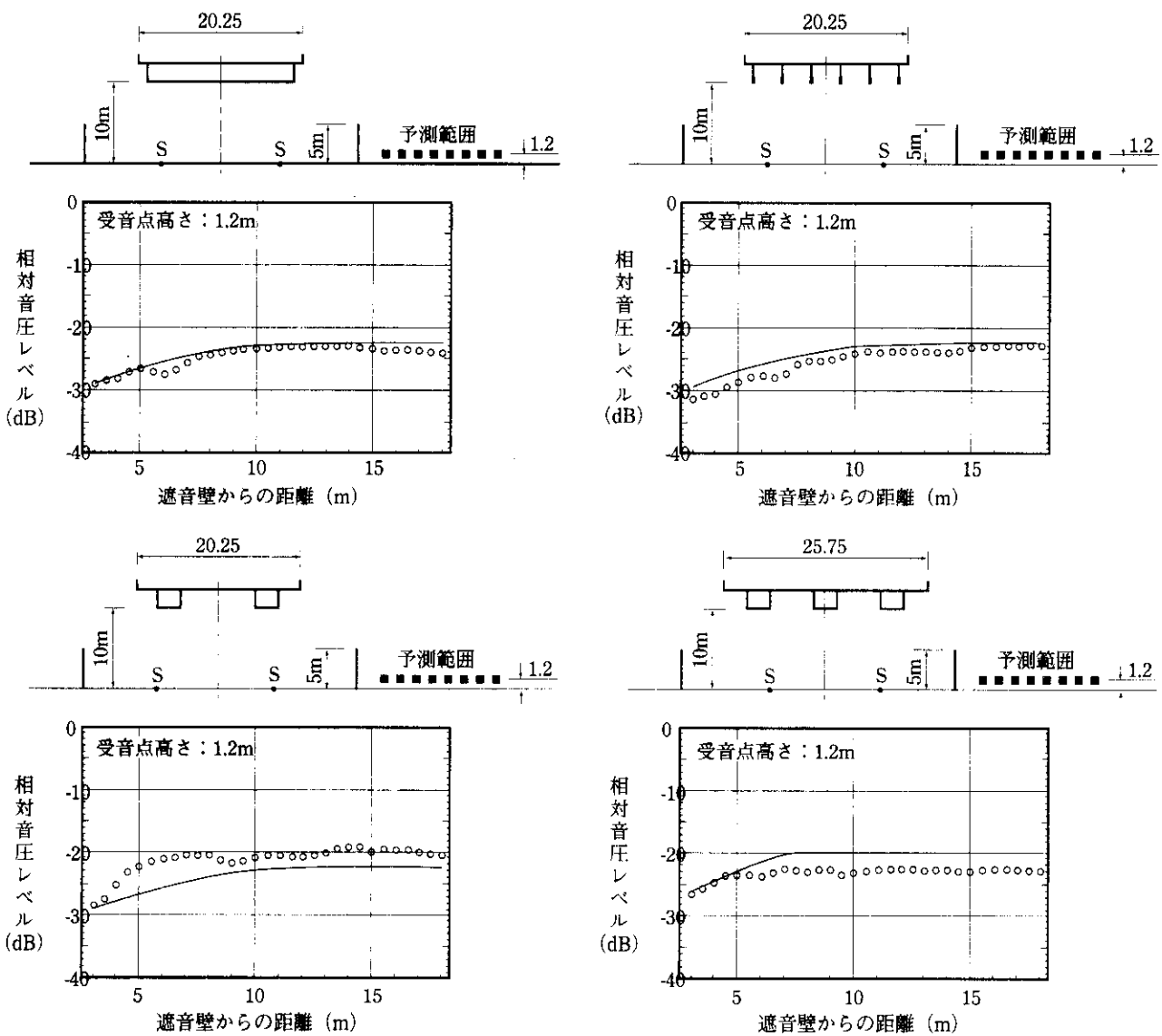


図-7 音源 (S)・反射面・受音範囲 (m)

当性を検討し、次に境界エネルギー積分法を用いて、遮音壁の回折計算に必要な反射面の分割数の検討を行った。さらに境界エネルギー積分法の計算結果を基準として散乱反射法の妥当性を検討した後、境界エネルギー積分法と散乱反射法を用いて、反射面と地面間の多重反射を計算するために必要な反射回数の検討を行った。

3-2 検討結果

計算結果は、音源の1m当たりのパワーレベルを基準とした伝搬量で表示しており、直接音と裏面反射音を合成している。



S: 音源, 実線: 境界エネルギー積分法, 丸印: 境界要素法

図-8 平面道路に遮音壁がある場合の断面での計算結果

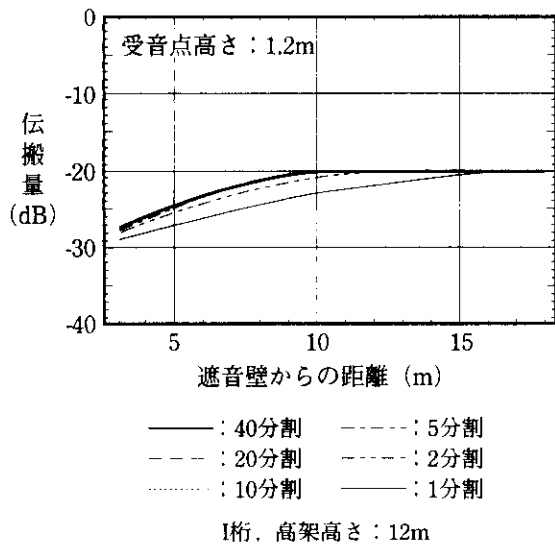


図-9 反射面の分割の影響

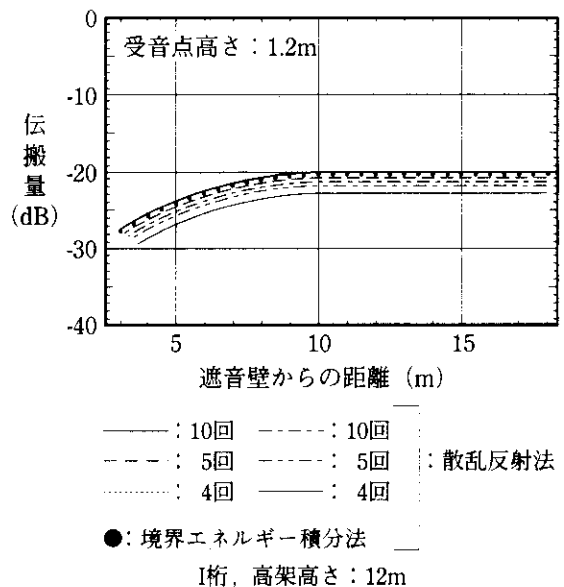


図-10 反射回数の影響

図-8に示すように、フラット桁では、境界要素法と境界エネルギー積分法の計算結果は比較的良好に一致している。I桁では、境界要素法の計算結果は境界エネルギー積分法の計算結果より0～3 dB小さい。箱桁では、2箱桁(反射面幅20.25m)と3箱桁(反射面幅25.75m)でその計算結果の傾向が異なり、境界要素法と境界エネルギー積分法の計算結果の差は0～5 dB程度である。図-8に示した以外の高架高さ、予測範囲においても同様の傾向が見られた。

境界エネルギー積分法で反射面をn分割したときの伝搬量計算結果を図-9に示す。この結果から、反射面の分割数は5分割以上(約4m幅)であれば計算結果はほぼ同じとなっている。

境界エネルギー積分法と散乱反射法による反射面と地面間の反射回数の検討結果から、それぞれの計算値は図-10に示すように非常によい一致を示しており、反射面と地面間の反射を計算する場合の反射回数は2回程度で十分と考えられる。

4. 線音源に対する遮蔽効果の近似式検討

4-1 検討概要

予測計算は、3次元モデルを用いるよりも2次元モデルの仮定が成り立てば、2次元モデルを用いる方が実用的である。道路交通騒音は、1台の

自動車を1つの点音源とし、この点音源を交通量に応じて分布させ、1つ1つの点音源からの伝搬量を計算しそれらを合成して求めている⁴⁾。したがって、遮蔽効果の計算も1つ1つの点音源について計算しなければならず、直接音と反射音がある場合は計算が非常に煩雑になる。線音源に対する遮蔽効果が計算できれば、2次元断面で遮蔽効果を計算すればよく、この線音源に対する遮蔽効果の計算手法を2次元の予測モデルに組み込めば、簡便な高架裏面反射音の予測モデルとなる。

本検討では、点音源に対する遮蔽効果の式を元にして、線音源に対する遮蔽効果の近似計算式を検討した。

4-2 線音源に対する遮蔽効果の近似計算式

点音源に対する遮音壁の遮蔽効果は、次式に示す前川の実験チャート⁴⁾の関数近似式⁵⁾で計算できる。

$$\Delta Ld = \begin{cases} -10\log_{10}N - 13, & \text{for } N \geq 1.0 \\ -5 \mp 8 \cdot \sinh^{-1}(|N|^{0.485}) / \sinh^{-1}(1), & \text{for } -0.324 \leq N < 1.0 \\ 0, & \text{for } N < -0.324 \end{cases}$$

N: フレネル数

上記の式を用いて、 $N \geq 1$ の範囲で線音源の遮音壁の遮蔽効果に対する山下・子安の実験式⁶⁾に

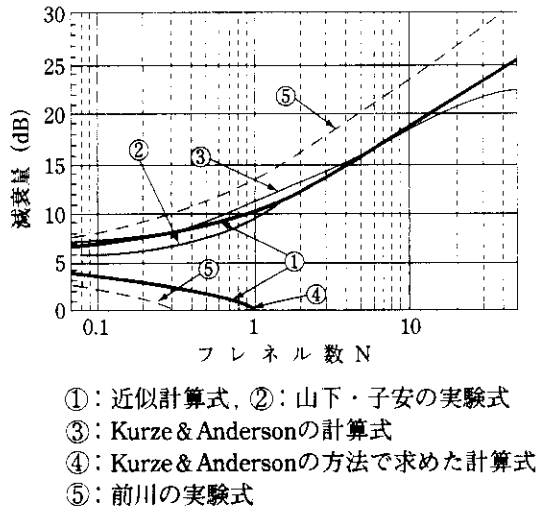


図-11 遮音壁の遮蔽効果の近似計算結果

一致するよう受音点直前の断面でのフレネル数 N を π で除した値を線音源に対するフレネル数 N_1 (等価フレネル数) とした。

図-11に示すように $N \geq 1$ の範囲では山下・子安の実験式にほぼ一致し、 $0 \leq N \leq 1$ の範囲では Kurze & Anderson⁷⁾の計算結果とよく一致している。

$N < 0$ の範囲については、線音源に関する既存の研究が見あたらないため、 $N \geq 0$ での Kurze & Andersonの研究と同様に点音源列での計算を行い、その結果と一致するように N_1 を求めた。検討の結果、 $N_1 = 2N/\pi$ を得た。

線音源に対する近似計算式は次式となる。

$$\Delta Ld = \begin{cases} -10 \log_{10} N_1 - 13, & \text{for } N_1 \geq 1.0 \\ -5 \mp 8 \cdot \sinh^{-1}(|N_1|^{0.485}) \\ \quad / \sinh^{-1}(1), & \text{for } -0.324 \leq N_1 < 1.0 \\ 0, & \text{for } N_1 < -0.324 \end{cases}$$

$$N_1 = CN/\pi,$$

$$C = 1 \text{ (for } N \geq 0), \quad C = 2 \text{ (for } N < 0)$$

5. 高架裏面反射音の予測モデル

5-1 予測モデル

今までの検討結果から、平面道路に遮音壁がない高架裏面の場合、フラット桁ではスリット

法が適切な予測モデルであり、I桁では散乱反射法が適切な予測モデルであると考えられる。箱桁の場合は、スリット法を駆使すれば予測は可能であるが、2箱桁や3箱桁のように桁側面の数が多くなると、計算が非常に煩雑になるため実用的には散乱反射法が適切と考えられる。

平面道路に遮音壁がある場合は、散乱反射法が適切なモデルと考えられる。

5-2 予測モデル式

スリット法および散乱反射法の予測モデルは以下のとおりである。

(1) スリット法 (3次元)

有限幅で剛な平板での反射は、反射面に対する音源の虚像から開口部を伝搬する回折現象として扱い、回折現象においてエネルギーの加減則が成り立つと仮定している (図-12)。

$$L_R = L_W - 8 - 20 \log_{10} l' - \Delta L_S$$

$$+ 10 \log_{10} (1 - \alpha)$$

$$\Delta L_S = -10 \log_{10} (10^{-\Delta L d_1/10}$$

$$- 10^{-\Delta L d_2/10})$$

L_R : 高架裏面反射音の音圧レベル [dB]

L_W : 音源のパワーレベル [dB]

ΔL_S : スリット法による減衰量 [dB]

$\Delta L d_{1,2}$: 障壁のエッジ 1, 2 での減衰量 [dB]

α : 反射面のエネルギー吸音率

l' : 虚音源から受音点までの距離 [m]

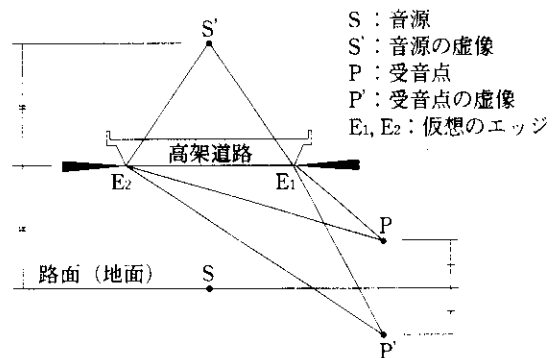


図-12 高架裏面での回折

(2) 散乱反射法

凹凸面での反射が Lambert の余弦則に従うと仮定し、断面形状が一定で連続した反射面の場合

(2次元) は次式で与えられる (図-13).

$$L_R = L_{W,line} - 7$$

$$+ 10 \log_{10} \{ (1 - \alpha) hH \}$$

$$- 20 \log_{10} (l \cdot l') + 10 \log_{10} \Omega$$

$$\Omega = 2 (x_P - x_S) \cdot \log_e (r_2 R_1 / r_1 R_2)$$

$$+ (d^2 - h^2 + H^2) \cdot \theta_S / h$$

$$+ (d^2 + h^2 - H^2) \cdot \theta_P / H$$

L_R : 高架裏面反射音の音圧レベル [dB]

$L_{W,line}$: 線音源の単位長さ当たりのパワーレベル [dB/m]

$$L_{W,line} = L_W - 10 \log_{10} D$$

L_W : 点音源のパワーレベル [dB]

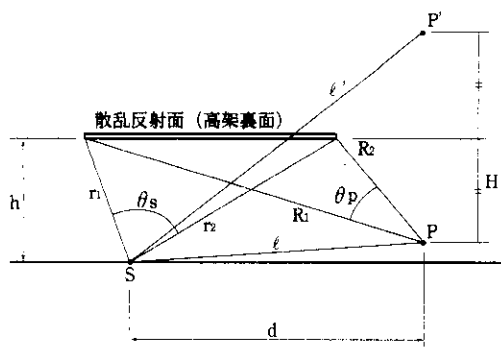


図-13 音源 (S)・反射面・受音点 (P) (m)

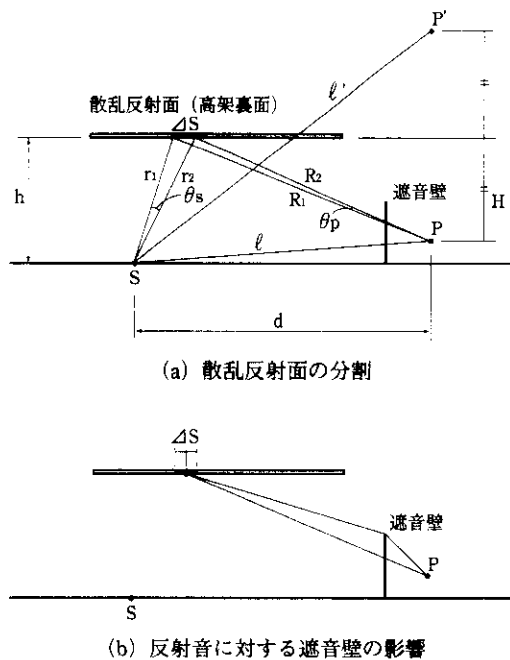


図-14 遮音壁の遮蔽効果のモデル

D : 平均車頭間隔 [m]

x_P : 受音点の水平座標 [m]

x_S : 音源の水平座標 [m]

平面道路に遮音壁がある場合には前述の式は使えないため、図-14に示すように反射面を分割し分割面の中心に線音源を仮定したときの遮音壁の遮蔽効果を計算し、分割面からの反射音を計算し反射面全体で合成する。

$$L_R = L_{W,line} - 7$$

$$+ 10 \log_{10} \{ (1 - \alpha) hH \}$$

$$- 20 \log_{10} (l \cdot l')$$

$$+ 10 \log_{10} \sum_i (\Omega_i \cdot 10^{\Delta L di / 10})$$

$$\Omega_i = 2 (x_P - x_S) \cdot \log_e (r_{2i} R_{1i} / r_{1i} R_{2i})$$

$$+ (d^2 - h^2 + H^2) \cdot \theta_{S_i} / h$$

$$+ (d^2 + h^2 - H^2) \cdot \theta_{P_i} / H$$

$\Delta L di$: 分割面 ΔSi の中心に仮定した線音源に対する遮音壁の遮蔽効果 [dB]

多重反射の計算は、音源の反射面および地面に対する反射回数毎の虚像を設定し、それぞれの虚像について反射音を計算し合成する (図-15).

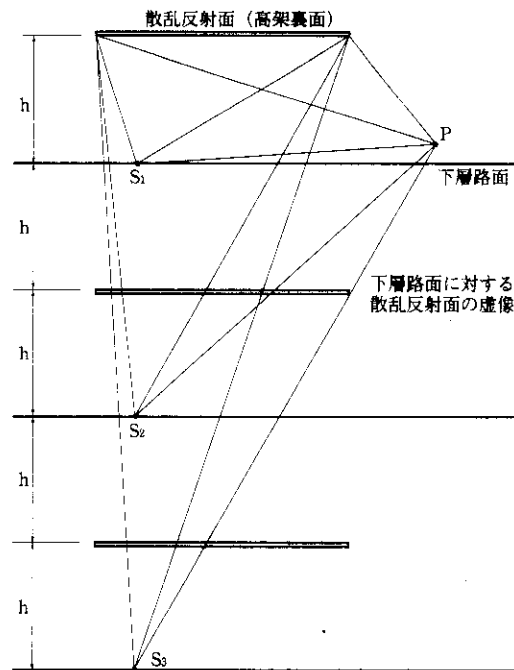


図-15 多重反射の計算モデル

$$L_R = 10 \log_{10} (\sum_i 10^{L_{Ri}/10})$$

L_{Ri} : i 番目の虚像に対する反射音の音圧レベル [dB]

あとがき

今回の検討結果から、桁の裏面形状による反射指向特性が明らかになり、平面道路に設置された遮音壁の遮蔽効果を簡便に計算できる有効な手法についても検討された。さらに、反射面の分割数や反射面と地面間の反射回数といった、計算上考慮する必要がある項目についても検討を行い、実用的な高架裏面反射音予測手法を示し、その妥当性を確認した。

高架裏面反射音の予測モデルは、道路交通騒音予測モデルの中の1つの部品であり、直接音の騒音レベル、高架構造物音の騒音レベルおよび高架裏面反射音の騒音レベルをエネルギー合成すれば、道路交通騒音の騒音レベルが求まる。

今回の検討結果は、都市高速道路等における道路交通騒音対策を検討する場面において活用が期待される。

本検討に当たりご指導をいただいた阪神高速道路騒音対策検討委員会（委員長 前川純一神戸大学名誉教授）の委員長をはじめ委員の皆様には深く感謝します。

参考文献

- 1) 福島昭則：Fresnel-Kirchhoffの近似回折理論に基づくスリット法の評価，日本音響学会講演論文集，pp.833-834，1994.
- 2) 福島昭則，一木智之，小西一生：高架裏面反射音の予測モデルに関する検討—種々の予測モデルの相互比較—，日本音響学会騒音・振動研究会，N97-53，1997.
- 3) 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，pp.29-32，1994.
- 4) 前川純一：障壁の遮音設計に関する実験的研

究，日本音響学会誌，18，pp.187-196，1961.

- 5) 山本真平，高木興一：前川チャートの数式表示について，騒音制御，15(4)，pp.40-43，1991.
- 6) 山下充康，子安 勝：線音源に対する障壁の遮蔽効果—模型実験による検討—，日本音響学会誌，29，pp.207-213，1973.
- 7) U. J. Kurze and G. S. Anderson：Sound attenuation by barriers, Applied Acoustics, 4, pp.35, 1971.