

IV-19

遮音壁の高性能化

北海道大学工学部 澤 永 正 行
 北海道大学工学部 正 員 長谷部 正 基
 北海道大学工学部 正 員 金 安 公 造

1. はじめに

屋外における騒音防止対策として、遮音壁がよく用いられている。特に道路交通騒音に対する騒音防止の方法として多用されている。

騒音の伝搬経路に遮音壁などの障害物があると音波の回折減衰効果によって、遮音壁が波長より十分大きければかなりの減衰が得られ、特に高い周波数の騒音に対して有効となる。その減衰量を予測し騒音防止計画に役立てるための研究は最近の数十年間に急速に進められ、現実環境アセスメントや騒音対策に広く応用されるようになった。その回折減衰効果の予測方法は種々のものがあるが、いづれも板状の遮音壁に対するものであり、その構造の改良や吸音性を扱ったものは少ない。また、近年の道路交通騒音状況の悪化に伴い、より効果の大きい騒音防止方法が望まれている。このため遮音壁に工夫を施し、性能を改善することが考えられる。

本研究では遮音壁の高性能化を目的とし、特に遮音壁上部の吸音性について検討する。また、その構造にも着目し、図-1に挙げた3つの形状の遮音壁を取り上げ比較検討を行う。

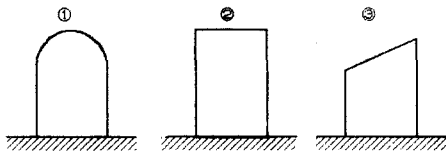


図-1 3つの遮音壁の断面形状

2. 研究手法

図-1で取り上げた3つの遮音壁に対してそれぞれ、上部の音響特性を変え、実験と計算の両方

で検討を行う。計算には、図-1の①の半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁に対しては Hayek¹⁾の理論に基づく手法を、図-1の②の水平な頂点を持つ厚い遮音壁と、図-1の③の傾斜した頂点を持つ厚い遮音壁に対してはグリーン関数による手法を用いる。

3. 半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁

半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁に対する研究の基礎としてはKeller²⁾が幾何光学理論による薄い遮音壁の回折計算式に関する研究の中で取り扱ったものがある。この理論は2次元空間を考え、入射波として平面波を用いたものであったが、これを3次元空間に拡張したのがHayekの理論である。

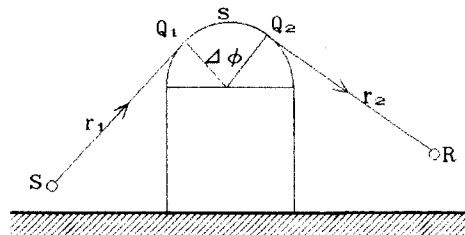


図-2 半円筒による回折

半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁による回折経路を考えると、遮音壁が無限に長い場合、音源Sから放射された音はある点 Q_1 を経由し、曲面 Q_1Q_2 に沿って伝搬し、受音点Rの方向に進む。このように、点 Q_1 、 Q_2 が円筒との接点であるとき、 SQ_1Q_2R は最短の経路である。

影の領域、すなわち、音源Sと Q_1 を通る直線により定義され、円筒の軸と平行な無限平面より下の領域では円筒後部への回折音のみが存在する。

半円筒の半径を a とし、そのほかの距離の定義を図-2の通りとすると、回折された点音源による音圧は以下のように書かれる。

$$P_d = \frac{\pi \sqrt{2\pi}}{6\sqrt{k^3 r_1 r_2 (r_1 + r_2)}} \left(\frac{ka}{6} \right)^{1/3} \cdot \exp i[k(r_1 + r_2 + s) + \pi/12] \cdot \sum D_m \exp(-\Delta \phi \alpha_m) \quad (1)$$

ここで、回折率 D_m は、

$$D_m = \{ [A'(q_m)]^2 + q_m [A(q_m)]^2 \}^{-1} \quad (2)$$

によって与えられ、減衰定数 α_m は、

$$\alpha_m = \exp(-i\pi/6) \left(\frac{ka}{6} \right)^{1/3} q_m \quad (3)$$

により得られ、また、

$$A(q_m) = \pi 3^{-1/3} A_1(-3^{-1/3} q_m) \quad (4)$$

$$A'(q_m) = -\pi 3^{-1/3} A'_1(-3^{-1/3} q_m) \quad (5)$$

である。ここで、 $A_i(x)$ はAiry関数であり、 $A'_i(x)$ はその導関数である。なお、 q_m は音響インピーダンス Z に基づく以下の超越方程式の m 番目の根である。

$$\frac{A'(q_m)}{A(q_m)} = \exp(5\pi i/6) \left(\frac{ka}{6} \right)^{1/3} \frac{\rho c}{Z} \quad (6)$$

根はBremmer³⁾による漸近方法により得られる。

式(1)で与えられる影の領域での回折された音圧は、音源 S から受音点 R まで直接回折された音線を示す。しかしながら、障壁の両側の地面による反射音線を計算に入れるためには直接回折経路 S から R に他の3つの可能な経路、 S' から R 、 S から R' 、 S' から R' を加える必要がある。ここで、 S' 、 R' はそれぞれ S と R の虚像の位置を示している。このように、受音点での全音場は4つの回折音線の合計である。相対音圧レベルは受音点での全音場と自由空間でのその比で定義される。

4. 水平な頂点を持つ厚い遮音壁

水平な頂点を持つ厚い遮音壁により回折された

音場の推定はグリーン関数を用いた手法で行った。この手法は長谷部⁴⁾が切土構造における騒音伝搬の解析に用いたものであるが、それを、厚い遮音壁用に修正して用いた。

大気中の音の伝搬はHelmholzの波動方程式

$$(\Delta + k^2)\phi(r) = -\delta(r - r') \quad (7)$$

によって記述される。ここで ϕ は速度ポテンシャルであり、 k は波数、 r' での音源はDiracのデルタ関数 $\delta(r - r')$ で表され、時間依存因子 $e^{-i\omega t}$ は省略して表す。

地面のある場合の近似された速度ポテンシャルは式(7)の解として、

$$\phi = \frac{\exp(ikR_1)}{4\pi R_1} + Q \frac{\exp(ikR_2)}{4\pi R_2} \quad (8)$$

により表現される。

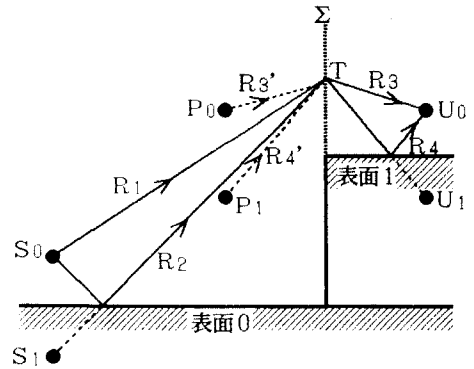


図-3 仮想境界面の設定

ϕ が仮想境界表面上(図-3参照)で定義されると、地表面の影響を記述するグリーン関数は Σ 上でDirichletの条件を満足する、すなわち、

$$G(U_0 | T) = 0 \quad (9)$$

$$(T : \Sigma \text{上})$$

とすると、これらの条件を満足できる解は、

$$G(U_0 | T) = \frac{\exp(ikR_3)}{4\pi R_3} + Q \frac{\exp(ikR_4)}{4\pi R_4} - \frac{\exp(ikR_3')}{4\pi R_3'} - Q \frac{\exp(ikR_4')}{4\pi R_4'} \quad (10)$$

である。グリーン関数を用いて U_0 での解を、

$$\phi(U_0) = - \int_{\Sigma} \phi(T) \mathbf{n} \cdot \nabla G(U_0 | T) d\sigma \quad (11)$$

のように得る。ここで、 $\phi(T)$ は式(7)により表現される仮想平面 Σ での速度ポテンシャルである。 $\mathbf{n}$ は表面 Σ と垂直な単位ベクトルであり、 $\int d\sigma$ は表面まわりの積分を表す。反射率 Q が変わらないという仮定のもとで、

$$\begin{aligned} \phi(U_0) = & 2 \int_{\Sigma} [\phi(T) (-ik + 1/R_3) \mathbf{x}_{R,0} \\ & + Q_1 (-ik + 1/R_4) \mathbf{x}_{R,1}] d\sigma \quad (12) \end{aligned}$$

を得る。ここで、

$$\phi(T) = \frac{\exp(ikR_1)}{4\pi R_1} + Q_1 \frac{\exp(ikR_2)}{4\pi R_2}$$

である。 Q_0 と Q_1 はそれぞれ表面0と表面1での反射率であり $x_{R,1}$ は T と U の水平距離である。

2つの座標面 Σ_1 と Σ_2 (図4参照)を設定し、この方法を2度適用して厚い遮音壁の伝搬に対する式(13)を得る。

$$\begin{aligned} \phi(R) = & \int_{\Sigma_1} \int_{\Sigma_2} \phi(T_1) \mathbf{n} \cdot \nabla G(T_1 | T_2) \mathbf{n} \\ & \cdot \nabla G(R | T_2) d\sigma_1 d\sigma_2 \quad (13) \end{aligned}$$

この方法を用いるとき、それぞれの表面に対して表面インピーダンスを用いて任意の反射率を適用することができる。

Q が道路に沿って一定であると仮定すると、座標面上の積分に対する近似として定常位相法を用いることができる。この方法を仮想平面 Σ_1 、 Σ_2 上に適用し、 $1/R_1$ の項を無視すると式(13)より大きな k (波数)に対する速度ポテンシャルを得る。

$$\begin{aligned} \phi(R) = & -ik \frac{d_M d_R}{8\pi^2} \int_0^\infty \sum_{j=1}^2 \sum_{k=3}^4 \sum_{l=5}^6 Q_{12} Q_{j4} Q_{k6} \\ & \times \frac{\exp[ik(R_1 + R_j + R_k)]}{[R_j R_k (R_1 + R_j) (R_1 R_j + a_S R_j R_k + a_M R_k R_1)]^{1/2}} \\ & \times dz_1 dz_2 \quad (14) \end{aligned}$$

ここで、

$$Q_{nm} = Q_m \quad (m=n)$$

$$1 \quad (m \neq n)$$

そして、

$$a_S = (d_S / (d_S + d_M))^2$$

$$a_M = (d_M / (d_S + d_M))^2$$

Q_2 、 Q_4 と Q_6 はそれぞれ、表面0、1、2上の反射率である。

式(14)の数値計算への適用には0から無限大の積分範囲を0からある有限高さ、 Σ_1 では $Z_{\max 1}$ 、 Σ_2 では $Z_{\max 2}$ までに置き換える必要がある。 Δz 、つまり間隔 z に対して 0.2λ (λ は波長)、 $Z_{\max 1}$ と $Z_{\max 2}$ に対して 20λ が低い周波数に対する十分な近似を与えることがわかっている。

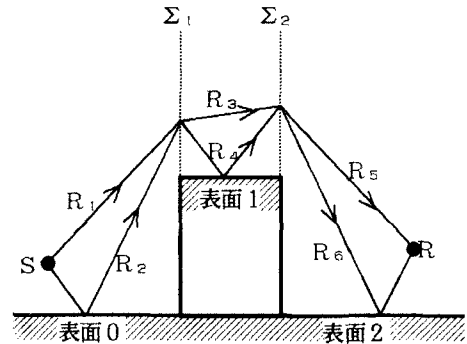


図-4 水平な頂点を持つ厚い遮音壁

5. 傾斜した頂点を持つ厚い遮音壁

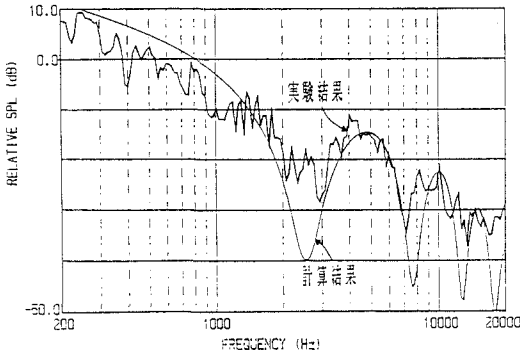
傾斜した頂点を持つ厚い遮音壁についても3.と同じ方法を用いた。しかし、この場合には表面1において反射された音の経路が存在しない場合を取り除かなければならない。したがって、(14)式を修正し、

$$\begin{aligned} \phi(R) = & -ik \frac{d_M d_R}{8\pi^2} \int_0^\infty \sum_{j=1}^2 \sum_{k=3}^4 \sum_{l=5}^6 Q_{12} Q_{j4} Q_{k6} \epsilon \\ & \times \frac{\exp[ik(R_1 + R_j + R_k)]}{[R_j R_k (R_1 + R_j) (R_1 R_j + a_S R_j R_k + a_M R_k R_1)]^{1/2}} \\ & \times dz_1 dz_2 \quad (15) \end{aligned}$$

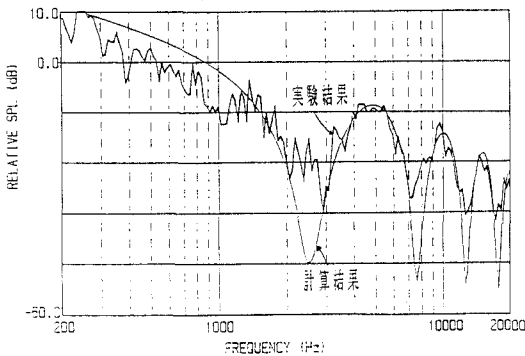
として用いる。反射された音の経路が存在しないとき ϵ は0とする。

6. 実験結果と計算結果

半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁に対する縮小模型実験の結果を計算結果とともに図-5に示す。



(a) $\sigma=300$ [cgs rays/cm] の場合



(b) $\sigma=20000$ [cgs rays/cm] の場合

図-5 半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁の結果

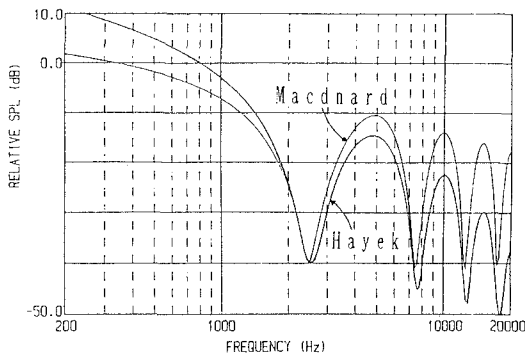


図-6 同じ高さの薄い遮音壁との比較

模型は、半径0.49mの塩化ビニール製の半円を取り付けた高さ0.52mのものをを用いた。円筒表面はカーペットを取り付けることで吸音性の表面を実現した。なお、円筒表面の音響特性を計算する場合は、DelanyとBazley⁵⁾の実験式より吸音性の場合を300 cgs rays/cmとし、反射性の場合を20000 cgs rays/cmとした。また、音源と受音点は円筒の中心からの水平距離1.5m、高さ0.1mに円筒をはさんで反対側に配置した。

図-6では同じ高さの薄い遮音壁に対するMacdonardの解による計算結果と比較した。

水平な頂点を持つ厚い遮音壁と傾斜した頂点を持つ厚い遮音壁の縮小模型実験結果については現在検討中である。

7. おわりに

本報告では、遮音壁に厚みをもたせ、吸音性を与えることによりその性能を向上させることを検討している。半円筒の頂点を持つ厚い遮音壁については、その円筒表面が反射性の場合、同じ高さの薄い遮音壁とそれほど遮音効果は変わらないが、吸音性の場合にはかなり遮音効果が得られた。

今後、他の構造の遮音壁についても検討する予定である。

【参考文献】

- 1) S.I.Hayek, "Attenuation by cylindrically topped wedge noise barriers," Proc. Internoise '87, China, pp.387-390, 1987.
- 2) J.B.Keller, "Diffraction by a convex cylinder," Trans. on Antennas and Propagation, Vol. Ap-4, pp.312-321, 1956.
- 3) H.Bremmer, "Terrestrial radio waves," Elsevier Pub.Co., New York, pp.36-46, 1949.
- 4) M.Hasebe and K.Kaneyasu, "Acoustic wave propagation over depressed road having finite impedances," J.Acoust.Soc.Jpn. (E) 8, 3, pp.77-84, 1987.
- 5) M.E.Delany and E.N.Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," Appl. Acoust. 3, pp.105-116, 1970.