

総合技術コンサルタント 正会員 ○三宅龍雄
建設省 土木研究所 正会員 足立義雄

1. まえがき 道路トンネル内の自動車から生じる騒音は、幾何音響学的に考えればトンネル内壁で多重反射しながら坑口外へと伝搬放射される。本文では半円形トンネルを対象として鏡像理論により坑内の吸音特性に応じた騒音伝搬の基本式を示し、その妥当性を模型実験で検証した。さらに実用性を加味して坑口外への騒音放射指向性状を近似する等価音源への置換法を考え、坑口周辺部の簡易な騒音予測計算手法¹⁾として提案した。

2. 基本式 半径 r_0 の半円形トンネルの中心にある点音源 S_0 を原点として、図-1に示される角度 θ, φ の方向に放射された音線の距離減衰 ΔL_e を考えてみる。音線を中心として微小角 $d\theta, d\varphi$ で区切られた音線管を想定すれば、単位距離での音圧レベルを基準とした ΔL_e は音源から単位距離の音線管の断面積 A_0 と経路長さ l での断面積 A との比によって次式で与えられる。

$$\Delta L_e = 10 \log_{10} A / A_0 = 10 \log_{10} r l / \sin \theta \quad (1)$$

n 回反射して受音点 $R(r, \varphi, z)$ に到達する音線は、見かけ上図-2に示される虚音源 S_n から放射された音線としてとらえることができる。したがって受音点における音圧レベルSPLは、各虚音源からの音の伝搬について式(1)の距離減衰や反射面での吸音減衰、坑口端での回折減衰などを考慮して

$$\begin{aligned} \text{SPL} = \text{PWL} - 8 + 10 \log_{10} \left[\sum_{m=0}^{\infty} A_{2m} Q(\theta_{2m}^*) \cdot 10^{-\frac{\Delta L_{d,2m}}{10}} \cdot \sin \theta_{2m} / r l_{2m} \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{\infty} A_{2m+1} Q(\theta_{2m+1}^*) C_{2m+1} \cdot \sin \theta_{2m+1} / r l_{2m+1} \right] \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、PWLは音源のパワーレベル、 A_n は n 回反射波の吸音による減衰比率であり、坑内壁面の平均吸音率を $\bar{\alpha}$ 、路面の平均吸音率を $\bar{\alpha}_g$ とすれば次のようになる。

$$A_n = \begin{cases} (1-\bar{\alpha})^m (1-\bar{\alpha}_g)^m & ; n=2m \text{ のとき} \\ (1-\bar{\alpha})^{m+1} (1-\bar{\alpha}_g)^m & ; n=2m+1 \text{ のとき} \end{cases} \quad (3)$$

また $\Delta L_{d,2m}$ は図-2のP-P_m面を開口部とする音源 S_{2m} に対する回折減衰量であり、係数 C_{2m+1} は受音点が坑内もしくは三角形PP₀P_mの領域にあるときに1となり、その他の場合は0である。音源 S_{2m} の指向係数 $Q(\theta_{2m}^*)$ は受音点を見通せるときにはその方向の指向係数 $Q(\theta_{2m})$ を用い、見通せない場合は壁端面のPまたはP_mを見込む方向の指向係数を用いるものとする。なお回折減衰量の算定にはU.J. Kurze²⁾が提案した次の簡易式を用いることにした。

$$\Delta L_d = 5 \pm 20 \log_{10} \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \quad (4)$$

ただし、 N はフレネル数($N = 2\delta/\lambda$)を表わし、 δ は回折経路差

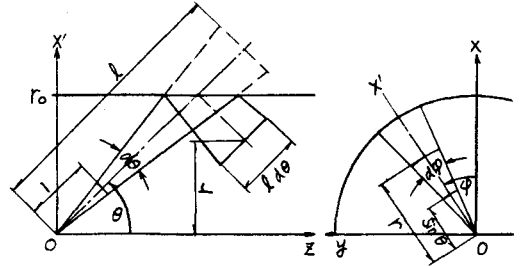


図-1 音線

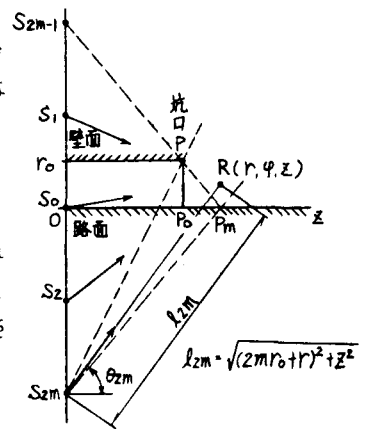


図-2 音源と受音点

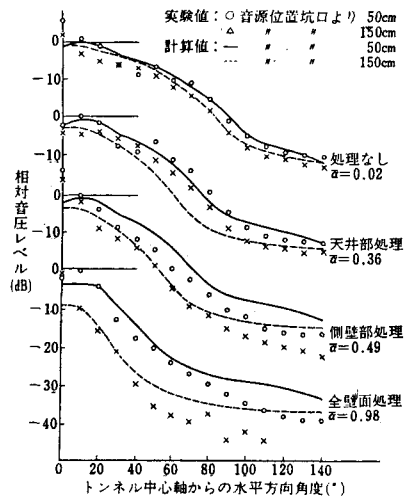


図-3 坑口からの騒音放射指向性状
(音源: 16kHz O.B.ノイズ, PWL=0dB)
($r_0 = 17.8 \text{ cm}$)

入は波長である。

3. 模型実験との対比 模型実験に用いたアクリル製のトンネルは馬蹄形断面であるので式(2)の数値計算においては、断面の等しい半円形に換算するとともに音源の指向性(指向係数4.0~0.1)を考慮した。図-3は受音点を坑口中心から扇状に配置して坑口からの音の放射指向性状を相対レベルで示したものであり、計算値は実験値とよく一致している。なお計算上、内壁面の $\bar{\alpha}$ はアクリル材と吸音材の面積比による加重平均として設定している。

4. 簡易手法 多重反射を含めた式(2)の伝搬予測式は、多数の虚音源による音圧を加え合わせることから多大な計算量を要する。そこで計算の簡略化のため、この虚音源群と実音源とを音響エネルギー的に等価な単一の点音源に置換し、その等価音源から坑口外へ伝搬放射させる簡易手法を考える。本文では等価音源の設定において、坑内の音源によって坑口から放射される音響パワー W_T と等価音源による音響パワー W_T' (ただし反射音を含まない)とが一致することを条件として、実音源と同じPWLを有する等価音源の設定位置を坑内の距離減衰特性に応じて定めた。すなわち坑口から Z_s の距離にある音響出力 W の無指向性点音源によって放射される W_T は、坑口に入射する音の断面法線方向の成分を坑口断面について積分して求められる。

$$W_T = \int_0^{r_0} \pi r \left(\frac{W}{2\pi r_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n \sin \theta_n \cos \theta_n}{r \ln} \right) dr = \frac{W}{2} A_T \quad (5)$$

ここで A_T は坑内の伝搬減衰を表わす係数であり、路面の吸音率を無視すると $\bar{\alpha}_s = 0$ より、次のようになる。

$$A_T = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha} (1 - \bar{\alpha})^m Z_s}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + Z_s^2}} \quad (6)$$

一方、等価音源を坑口から Z_s' の位置でトンネル中に軸上に置くと坑口放射パワー W_T' は次式で与えられる。

$$W_T' = \frac{W}{2} \int_0^{r_0} \frac{r Z_s'}{(r^2 + Z_s'^2)^{3/2}} dr = \frac{W}{2} \left(1 - \frac{Z_s'}{\sqrt{r_0^2 + Z_s'^2}} \right) \quad (7)$$

式(5)、(7)で $W_T' = W_T$ と置くことにより、等価音源の設置位置 Z_s' が定められ、この等価音源によるSPLは受音点までの距離を l 、坑口端での回折減衰量を ΔL_d として次式で与えられる。

$$Z_s' = r_0 (1 - A_T) / \sqrt{1 - (1 - A_T)^2} \quad (8.a) \quad SPL = PWL - 8 - 20 \log_{10} l - \Delta L_d \quad (8.b)$$

図-4は無指向性点音源による坑口放射指向性状を式(2)と簡易式(8)とで比較したものであり、概ねよく一致している。なお式(8.a)の適用に際し、坑内距離減衰量 ΔL_T が実験式で与えられているような場合には、式(6)のかわりに $A_T = 10^{-\Delta L_T/10}$ として計算すればよい。

道路トンネル坑口周辺での騒音レベル(L_{50})の予測では、等間隔モデルを用いるものとして、音響学会式による推計値に道路の見込み角度の補正を加えた明り部道路からの騒音 L_0 と、式(8)の簡易式を用いて坑内の自動車配置に応じた坑口からの騒音 L_T とを合成すればよからう。図-5は、半径5.5^mの実大トンネルを例として、トンネル長や壁面吸音率などをパラメータとした L_{50} の距離減衰性状を示したものである。

参考文献 1)建設省土木研究所, 土研資料第1845号, S57.6, 2)石井聖光, 日本音響学会誌, Vol.31(8), 1975

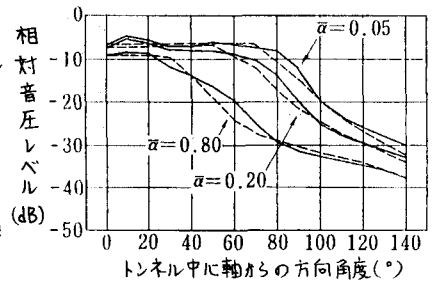


図-4 坑口放射指向性状の比較

(PWL=0 dB, $r_0=17.8$ cm, $Z_s=50$ cm, $\bar{\alpha}_s=0$)
実線は基本式(2), 点線は簡易式(8)

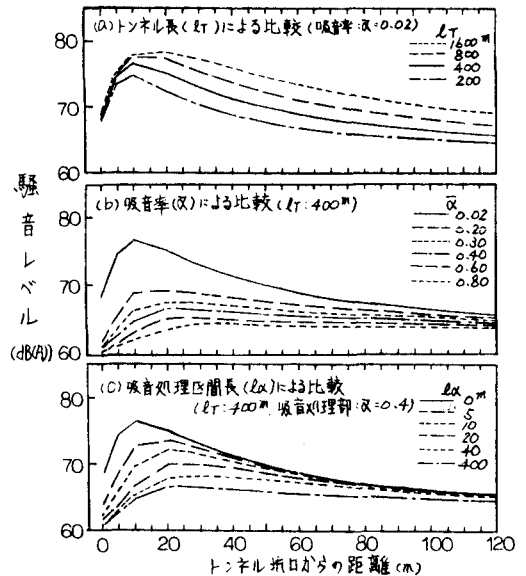


図-5 トンネル坑口部の騒音距離減衰

(交通量:1600台/ℓ, 大型車混入率:15%, 車速:50km/ℓ)
(受音位置:路肩から10m, 代表周波数:500Hz)