

道路トンネルの騒音伝播特性

PROPAGATION OF ROAD TRAFFIC NOISE AROUND
THE PORTAL OF TUNNEL

三 瀬 貞*・足 立 義 雄**

By Tadashi MISE and Yoshio ADACHI

1. ま え が き

わが国では鉱山や製錬所のような鉱工業の面からの環境汚染は長い歴史を有しているが、10 数年ほど前から道路交通に伴う環境問題も社会的に取り上げられてきているのは周知のことである。その中の1つとして道路交通騒音があり、最近では道路建設に際して都市部でも地方部でもトンネルを施工する機会が増加し、坑口部周辺の騒音伝播に注目を浴びることが多い。トンネル坑口部周辺における騒音についてはトンネル内を走行する自動車からの音がトンネル内を伝達し、それが集積されたような形で坑口から放射されると考えられる。

この課題は道路工学と音響学の間領域に属するもので、道路工学の面から考えると騒音それ自体が道路構造物とまったく異質な性格のものであるうえに、感覚が個人的に違うという点などからあまり取り扱われず、トンネル坑口の騒音伝播についての研究はない。しかし、騒音計を通して実際に測定された事例はいくつかある^{1),2)}。一方、音響学の面では建物内の廊下を伝達する音について検討したり³⁾、音源の指向性が与える影響について研究を行ったりしているが⁴⁾、実際にトンネル坑口部周辺の実測騒音分布と比較しているものはまだない。したがって、研究例ははなはだ少ないが、その割には環境影響評価などを通して予測手法が大いに要求されており、これらの手法の確立が期待されているものである。現在のところ、トンネル内における伝播距離に比例した減衰量を用いて坑口部周辺の道路交通騒音を簡単に予測する方法によっている^{5),6)}。

このような観点を踏まえて、本文ではトンネル内を音が多重反射し坑口より指向性状を有して放射することを考慮に入れて、実状に即した設計法にまとめるこ

とを目的として、以下に示すような検討を行ったものである。まず、トンネル内壁の吸音特性を考慮し、トンネル内を伝達する音圧分布とそれがトンネル外へ放射されたときの状態をモデル化して基礎的な関係式を示し、そのモデルの妥当性を模型実験により検証した。次に実用性を加味して等価な音源を坑口近くに仮定することにより、近似的に簡略式が得られるように変換している。さらにこの方法を実際にトンネル坑口部周辺で測定された実測結果と対比することにより、適用性があることを確かめている。以上の検討結果に基づいて道路トンネル坑口部周辺における騒音レベルが予測でき得る実用的な手法を提案したものである。

2. 基本的な考え方と関係式

問題を簡単にするために、半円形断面のトンネルを考えて、そのトンネル内および坑口周辺における騒音特性を調べることにする。トンネル内を走行している1台の自動車より発生する音は、多重反射してトンネル坑口方向に伝達されると考えることができる。実際のトンネル内面は完全鏡面ではなく、多かれ少なかれ散乱波を生じているが、ここでは反射面において音は鏡面に対する光のように反射するとみなして取り扱う音響学で通常用いられている考え方によることとする⁷⁾。

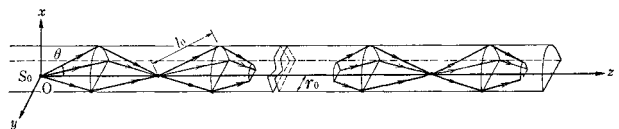


図-1 トンネル内の音の伝播

(1) トンネル内の伝播

半径 r_0 の半円形トンネルにおいてその中心に点音源 S_0 があるとき、図-1 に示すように音源から任意の方

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 建設省土木研究所道路部交通環境研究室

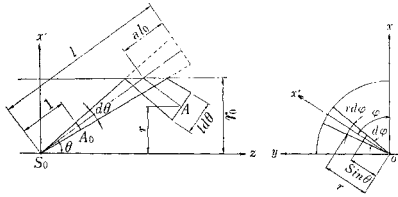


図-2 ray tube

向に放射される音はトンネル坑口方向へ反射しながら伝達してゆく。音源からトンネル中心軸と θ の角度で放射される音線（音の軌跡を示す）に対しては距離 $l_0=r_0/\sin \theta$ 進むごとに反射される。このとき、 xy 平面に射影された音線を考えると、円の中心位置から半円形壁面に入射するので音線は壁面に対して垂直となり反射経路は入射経路と同一となる。したがって、偶数回反射された音線は発散する方向に伝播され、奇数回反射された音線は中心軸上に収束する方向で伝播する。

そこで、図-2 に示されるような音源から角度 θ, φ の方向に放射された音線に沿って距離減衰を考えてみる。反射面では吸音しないと考えると微小角 $d\theta, d\varphi$ で区切られた ray tube（音線束）を想定すれば、単位距離でのレベルを基準として距離減衰量 ΔL は音源から単位距離での ray tube の音線に垂直な断面積 $A_0=\sin \theta d\theta d\varphi$ と経路長 l での断面積 $A=rld\theta d\varphi$ との比によって与えられる。

$$\Delta L=10 \log _{10} A / A_0=10 \log _{10} r l / \sin \theta \cdots \cdots (1)$$

l と中心軸からの距離 r は反射回数 n と反射点間距離 $l_0=r_0/\sin \theta$ を用いて、

$$l=(n+a) l_0 \cdots \cdots (2)$$

$$r=\left. \begin{array}{l} (1-a) l_0 \sin \theta : n \text{ が奇数のとき} \\ a l_0 \sin \theta : n \text{ が偶数のとき} \end{array} \right\} \cdots \cdots (3)$$

と表わされる。ただし、 a は図-2 に示されている $0 \leq a < 1$ の値である。これより式 (1) は次のように変換される。

$$\Delta L=20 \log _{10} l_0+\left\{ \begin{array}{l} 10 \log _{10}(1-a)(n+a): \\ \quad n \text{ が奇数のとき} \\ 10 \log _{10} a(n+a): \\ \quad n \text{ が偶数のとき} \end{array} \right\} \cdots \cdots (4)$$

この式を用いて音線に沿った距離減衰性状を相対音圧レベルで図示すると図-3 のようになる。

すなわち、1 回目の反射をする前 ($l/l_0 \leq 1$) では倍距離 6 dB の減衰となるが、それ以後は $l/l_0=2, 4, 6, \dots$ の点で無限大

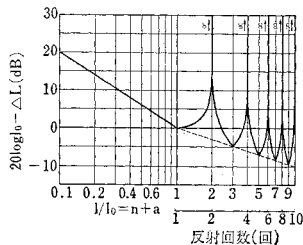


図-3 音線に沿った距離減衰性状

の音圧レベルに近づき、また同一の r をもつ受音点位置（たとえば $l/l_0=1, 3, 5, \dots$ の点）間での距離減衰は倍距離 3 dB の線音源的な減衰性状を示して伝播する性質を有している。

ray tube の音線に垂直な断面は一般的には四辺形であるが、反射点近傍においては四辺形とは異なってくる。それを厳密に検討すると、 $l/l_0=1, 3, 5, \dots$ の位置であるトンネル壁面での反射点近傍では、

$$\Delta L=10 \log _{10}\left(r_0-l \cos \theta \cdot d \theta / 4\right) l / \sin \theta \cdots \cdots (5)$$

となり、 $l/l_0=2, 4, 6, \dots$ の位置であるトンネル路面での反射点近傍では、

$$\Delta L=\log _{10}(l \cos \theta \cdot d \theta / 4) l / \sin \theta \cdots \cdots (6)$$

である。したがって、高次の微小項を無視することにより式 (1) と一致し、図-3 に示された減衰性状になることが理解できる。

いま、図-4 のように音源位置を原点とした円柱座標系で考え、任意の受音点 $R(r, \varphi, z)$ に到達した n 回反射した音線は見掛け上図示された仮想音源 S_n から放射された音線としてとらえること

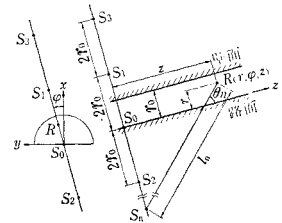


図-4 トンネル内にある受音点 R の状態

ことができ、その経路長 l_n および z 軸となす角 θ_n は次式で与えられる。

$$l_n=\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{\{(n+1) r_0-r\}^2+z^2}: n \text{ が奇数のとき} \\ \sqrt{(n r_0+r)^2+z^2}: n \text{ が偶数のとき} \end{array} \right\} \cdots \cdots (7)$$

$$\theta_n=\cos ^{-1}(z / l_n) \cdots \cdots (8)$$

また、経路中の壁面と路面では一般に吸音が生じ、 n 回の反射後では次の式で与えられる減衰比率を表わす係数 A_n を考慮する必要がある。

$$A_n=\left. \begin{array}{l} (1-\bar{\alpha})^{(n+1) / 2} \cdot\left(1-\bar{\alpha}_f\right)^{(n-1) / 2}: \\ \quad n \text{ が奇数のとき} \\ \left(1-\bar{\alpha}\right)^{n / 2} \cdot\left(1-\bar{\alpha}_f\right)^{n / 2}: \\ \quad n \text{ が偶数のとき} \end{array} \right\} \cdots \cdots (9)$$

ただし、 $\bar{\alpha}$ はトンネル壁面の平均吸音率、 $\bar{\alpha}_f$ は路面の平均吸音率を表わし、トンネル内では一様とみなしている。したがって、受音点 R における音圧レベル SPL は位相差を無視して各仮想音源からの音響エネルギーの和として求めると、式 (1)、(9) より次のようになる。

$$\text{SPL}=\text{PWL}-8+10 \log _{10}\left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n \sin \theta_n}{r l_n} \cdot Q\left(\theta_n\right)\right] \cdots \cdots (10)$$

ただし、PWL は音源のパワーレベル、 $Q(\theta)$ は音源の θ 方向の指向係数であり、無指向性のときには $Q(\theta)=1$ となる。なお、壁面の吸音率が音源から距離 z_B の地点

において $\bar{\alpha}_1$ から $\bar{\alpha}_2$ と変化する場合には $z > z_B$ の受音点に到達する音線の A_n は次のようになる。

$$A_n = \left. \begin{aligned} &(1 - \bar{\alpha}_1)^{(n+1)/2 - n'} \cdot (1 - \bar{\alpha}_2)^{n'} \cdot (1 - \bar{\alpha}_f)^{(n-1)/2} : \\ &\quad n \text{ が奇数のとき} \\ &(1 - \bar{\alpha}_1)^{n/2 - n'} \cdot (1 - \bar{\alpha}_2)^{n'} \cdot (1 - \bar{\alpha}_f)^{n/2} : \\ &\quad n \text{ が偶数のとき} \\ &\dots\dots\dots(11) \end{aligned} \right\}$$

ここで、 n' は吸音率が $\bar{\alpha}_2$ の壁面で反射する回数であり、次式で与えられる。

$$n' = \left. \begin{aligned} &\{(z - z_B) \tan \theta_n + r_0 + r\} / 2r_0 : \\ &\quad n \text{ が奇数のとき} \\ &\{(z - z_B) \tan \theta_n + r_0 - r\} / 2r_0 : \\ &\quad n \text{ が偶数のとき} \end{aligned} \right\} \dots\dots(12)$$

(2) トンネル坑口からの放射

トンネル坑口から放射され周辺部の受音点 R に到達する音線の経路はトンネル内における場合と同様に図-5 に示されるような状態となり、仮想音源と受音点との関係により伝播状態が決まってくる。奇数回反射された音線は仮想音源 S_{2m-1} からの伝播と考えられ、坑口 $P-P_0$ 面を開口部として放射し、偶数回反射された音線は仮想音源 S_{2m} から $P-P_m$ 面 (ただし、 P_m は S_{2m-1} と P を結ぶ延長線と z 軸との交点) を開口部とした伝播を行う。したがって、反射回数を偶数と奇数とに分けて坑口周辺部の音圧レベルは式 (10) と同様に次式で与えられる。

$$SPL = PWL - 8 + 10 \log_{10} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{A_{2m} \sin \theta_{2m}}{r l_{2m}} Q(\theta_{2m}^*) \cdot 10^{-L_D(S_{2m})/10} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_{2m-1} \sin \theta_{2m-1}}{r l_{2m-1}} Q(\theta_{2m-1}) \cdot 10^{-L_D(S_{2m-1})/10} \right] \dots\dots(13)$$

ここで、 $L_D(S_{2m})$ は音源 S_{2m} に対応する回折減衰量であり、音源 S_{2m} に対する指向係数 $Q(\theta_{2m}^*)$ としては受音点を直接見通せるときにはその受音点方向の指向係数、すなわち $Q(\theta_{2m})$ を用い、直接見通せず回折するときには障壁端とみなし得る P または P_m を見込む方向の指向係数によるものと判断できる。

式 (13) を用いて坑口周辺部の音圧レベルを求めるためには、式 (13) に含まれている L_D を推定することが必要となる。回折減衰の算定方法には種々の理論式や実験式がすでに発表されている

が^{8),9)}、ここでは実用的な面を重視して Kurze ら¹⁰⁾が提案した回折減衰量 L_D で定めることとする。

$$L_D = 5 \pm 20 \log_{10} \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\tanh \sqrt{2\pi|N|}} \dots\dots\dots(14)$$

ただし、 N はフレネル数 ($N = 2\delta/\lambda$) を表わし、 δ は音源と受音点間の回折経路差、 λ は波長である。複号は $N > 0$ のとき +、 $N < 0$ のとき -、 $N = 0$ のときは $L_D = 5$ とする。

式 (14) は厚みのない剛な半無限障壁による回折減衰量を与える近似式であり、障壁面での反射による影響も含むとみなし得る。仮想音源 S_{2m} に対する L_D として式 (14) を適用すれば、鏡像の位置関係にある仮想音源からの影響も考慮されることになる。したがって、式 (13) 中の $L_D(S_{2m-1})$ については、受音点が三角形 PP_0P_m の範囲に存在するときは 0、それ以外は無限大となる。

3. 実験データによる検証

(1) 模型実験方法

実験は音響特性が確認されている土木研究所の無響室 (室内容積：約 180 m³、内寸法：7 m × 7 m × 5 m、暗騒音：16 dB(A)、30 dB(C)) で行っている。模型トンネルは実際のトンネル寸法から約 1/30 の縮尺率で想定して幅 290 mm、側壁立上り高さ 50 mm、全高 201 mm の図-6 に示すような断面で、厚さ 10 mm のアクリル材で製作している。実験音としては、ツイータから放射されるオクターブバンドノイズおよび 3.15 kHz より 40 kHz の範囲で出力が一様な特性を有するワイドノイズを使用しており、図-7 のような流れで実験計測している。点音源として使用したツイータは一様な音響特性でなく、指向性を若干有しており、音響出力として図-8 に示すような指向性のものをここでは使用している。したがって、実験結果を対比するときには $Q(\theta)$ として指向性を考慮

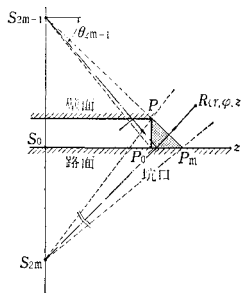


図-5 トンネル外にある受音点 R の状態

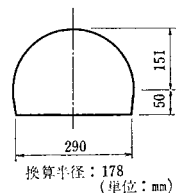


図-6 模型トンネル

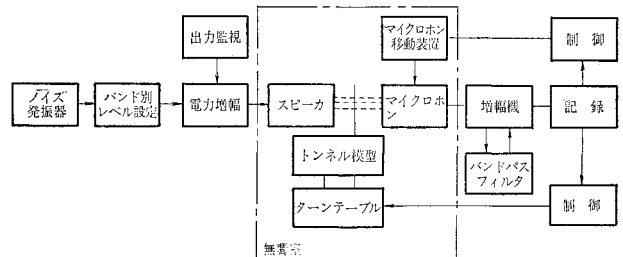


図-7 実験の流れ

に入れて検討している。

受音点には BK 社の 1/4 インチマイクロホンを設置して、トンネル内の距離減衰および坑口周辺部の音圧分布を測定している。このときに模型トンネル内に吸音材（残響室法吸音率は、8, 16 kHz のオクターブバンドノイズに対し 0.98, ワイドノイズに対して 0.87）を用いて種々の吸音処理を施したときの音圧分布をも測定して検証している。

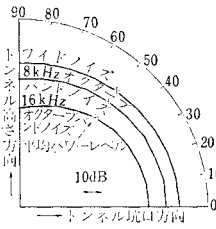


図-8 音源の指向性

(2) 実験結果

模型実験に用いたトンネルは馬蹄形断面をしているので、2. で示した関係式を適用して数値計算をするために断面積が等しくなるように半径を定め、半円形トンネル（この場合には半径 178 mm）に換算して実験値との比較を行う。音圧レベルの計算にあたっては式 (10), (13) に含まれた無限級数を計算しなければならないが、受音点位置にかかわらず計算に含める音源の出力が変化しないように項数を決定し、音源からの音の放射角度との関係から放射角度を最大 θ_{max} まで考慮することにより $M = (\alpha \tan \theta_{max} - r_0) / 2r_0$ として項数を定めることとする。ここに示した模型実験結果との対比では $\theta_{max} = 88^\circ$ としているが、このときに半円錐状の放射範囲の立体角は $\pi(1 - \cos 88^\circ)$ となり、無指向性点音源としたときには全音響エネルギーの 97% が計算に含まれることとなる。

a) トンネル内の距離減衰

トンネル内の距離減衰性状を音源から 10 cm の位置におけるレベルを基準として相対音圧レベルで図示すると、ワイドノイズに対して図-9 のようになる。トンネル内で測定された結果とともに式 (10) による計算結果も示している。一般に点音源から拡散される音は自由空間中において倍距離当たり 6 dB で音圧レベルが減衰してゆくが、その点からみると図-9 に示した減衰は非常に小さいことがわかる。倍距離に対して 1 dB 程度にすぎない。

計算結果との比較ではアクリル材にもわずかな吸音性

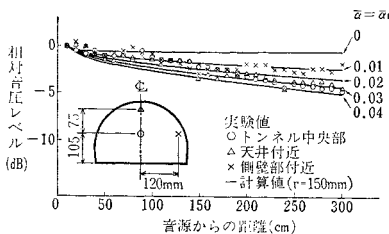


図-9 トンネル内距離減衰 (音源: ワイドノイズ)

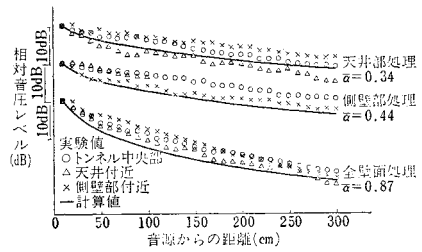


図-10 吸音処理時のトンネル内距離減衰 (音源: ワイドノイズ)

状に相当するものを見込むことができ、吸音率を 0.01 ~ 0.03, 平均的には 0.02 程度と設定が可能となる。実験値は測定位置により若干相違しているものの実験値と計算値の減衰性状はかなりよく整合している。したがって、トンネル内で音の多重反射を考えた式 (10) が有用であるといえる。

図-10 は吸音処理時の距離減衰について実験値と計算値を比較したものである。実験はトンネル壁面のうち、天井部を吸音処理した場合、側壁部を吸音処理した場合および全壁面を吸音処理した場合について行っており、実験値では吸音処理部に近い測定点で減衰量が若干大きくなる傾向が見受けられる。なお、トンネル断面形状などが実験条件と計算モデルとは異なるため、計算に際しては吸音処理部の範囲を忠実に導入せず、壁面の平均的な吸音率に換算して計算を行っている。すなわち、アクリル材の部分と吸音材の部分の面積比を考慮して平均吸音率 α を設定している。したがって、計算結果は実験結果と若干条件が異なっているが距離減衰性状はほぼ一致しており、特に音源から距離が離れるにつれて両者がよりよく一致してくる。これは実験における壁面の吸音特性が周方向に均一でなくてもある程度の伝播距離を有すると拡散音場的な傾向が強まり、実験値と計算値の減衰特性が合致するようになるものと考えられる。また、図-11 には一部の区間に吸音処理を施した場合の距離減衰が示してある。いずれの場合も計算値は実験値とよく一致しており、本計算法の妥当性を表わすものである。

b) トンネル坑口からの放射性状

受音点を坑口中心から距離 80 cm の扇状に配置して

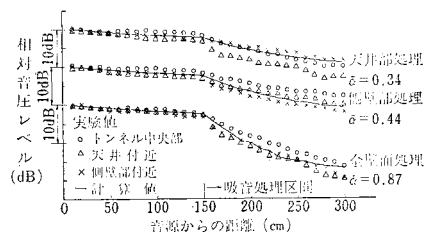


図-11 吸音処理区間を含むトンネル内距離減衰 (音源: ワイドノイズ)

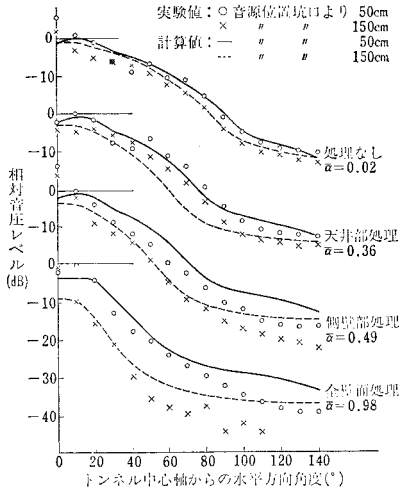


図-12 トンネル坑口からの放射指向性状 (音源: 16 kHz オクターブバンドノイズ)

地面から 10.5 cm の高さでトンネル坑口からの音の放射性状を測定した。中心周波数 16 kHz のバンドノイズに対する実験結果を式 (13) による計算値とともに、PWL=0 dB として相対音圧レベルでまとめたものが図-12 である。トンネル中心軸方向からの角度との関係で図示しており、坑口からの伝播については指向性が非常に強く現われていることがわかる。a) と同様に模型トンネル内における吸音処理の状態により減衰量が異なっており、吸音処理が強化されるほどトンネル軸方向への指向性が強まっている。

実験値と計算値を比較すると無処理時の音圧レベルが最もよく一致しており、吸音処理の効果が大きくなるにつれてずれが目立つ。特に側壁部が吸音処理されている場合、坑口側方から背面にかけて受音角度が大きくなるにつれて計算値の音圧レベルが大きくなる傾向が見受けられる。これは水平方向の放射指向性状に対して側壁吸音や全壁面吸音の状態では、坑口端部が現実には吸音性の障壁として作用するのに対し、計算上は反射性の障壁として取り扱われているためと推察される。

図-13 は坑口端部に全壁面の吸音処理を施した場合の放射指向性状について、実験値と計算値の比較をしたものである。この場合も吸音処理を区間が長くなるほど坑口側方での誤差が大きくなる傾向にあるが、おおむねよく対応している。

以上のように吸音処理の状態により多少の誤差を伴っているが、トンネル坑口からの放射性状についてもかなりの精度で一致しているということができ、特に通常の吸音処理を施していない状態ではよく整合しており、式 (13) が十分な適合性を有しているものと思われる。

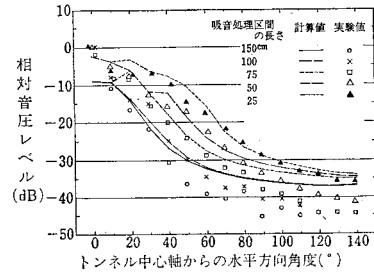


図-13 吸音処理区間を含むトンネル坑口からの放射指向性状 (音源: 16 kHz オクターブバンドノイズ, 音源位置: 坑口より 150cm)

4. 近似的手法への変換

トンネル内にある音源から伝播し放射される音圧レベルを計算する式 (10), (13) が模型実験結果と適合しよい対応関係にあることを示したが、実際の坑口周辺部における道路交通騒音伝播への適用性を考えると、多数の仮想音源による音圧を加え合わせて計算することからかなりめんどろな計算をしなければならない。そこで簡略な計算手法に変換するため、この仮想音源群を音響エネルギーが等価な単一の点音源に置換し、1つの等価点音源から坑口外へ伝播放射させるという方法を考える。図-12 でみられるように、坑口から放射される音は音源から坑口までの距離減衰量が大きくなるほどトンネル軸方向への指向性が強くなる傾向にある。この指向性状は、トンネル内の距離減衰特性を考慮したうえで1つの等価点音源をトンネル内の適宜な位置に置けば、それからの放射指向性状で近似できるという考え方に基づいている。この近似手法によれば、容易にトンネル外部の障壁などによる減音効果を組み入れて計算することが可能となる。

本文ではこの等価音源の設定において、トンネル内の実音源によって坑口から放射される音響出力と等価音源の音響出力(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いる。この条件で実音源と同じパワーレベルを有する等価音源の置換位置をトンネル内の距離減衰に応じて求めることにする。なお、ここで取り扱う音源は、簡便性と一般の道路交通騒音予測計算法^{(11),(12)}との整合性などから、無指向性点音源とみなすことにする。

いま、トンネル坑口から z_0 の距離にある音響出力が W の無指向性点音源によって坑口から放射されるパワー W_T は、式 (10) における各入射波の坑口断面に垂直な成分を取ってまとめると、次のように表わされる。

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

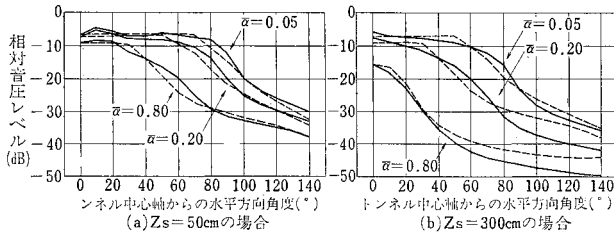


図-14 式(13)と式(19)による計算値の比較 (PWL=0 dB, $r_0=17.8$ cm, 実線は式(13)による計算値, 点線は式(19)による計算値)

$$= \frac{W}{2} \left[1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\bar{\alpha}_f \cdot A_{2m-1} \cdot z_s}{\sqrt{(2mr_0)^2 + z_s^2}} - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha} \cdot A_{2m} \cdot z_s}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + z_s^2}} \right] \dots \dots \dots (15)$$

ここで [] 内を A_T とすると, A_T は騒音伝播の減衰を表わす係数となり, トンネル内壁が完全反射 ($\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_f = 0$) の場合には最大値 $A_T = 1$ で, 完全吸音 ($\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_f = 1$) の場合には最小値 $A_T = 1 - z_s / \sqrt{r_0^2 + z_s^2}$ である. なお路面における吸音性状を無視すると $\bar{\alpha}_f = 0$ より

$$A_T = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})^m z_s}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + z_s^2}} \dots \dots \dots (16)$$

と簡単になる. 一方, 等価点音源を坑口から距離 z_s' の位置でトンネル中心軸に置いたときに坑口放射パワー $W_{T'}$ は次式で与えられる.

$$W_{T'} = \frac{W}{2} \int_0^{r_0} \frac{r z_s'}{(r^2 + z_s'^2)^{3/2}} dr = \frac{W}{2} \left[1 - \frac{z_s'}{\sqrt{r_0^2 + z_s'^2}} \right] \dots \dots \dots (17)$$

式(15)と式(17)で示されたパワーを等しいとおくことにより, 等価点音源を置くべき位置 z_s' は次のように定められる.

$$z_s' = \frac{r_0(1-A_T)}{\sqrt{1-(1-A_T)^2}} \dots \dots \dots (18)$$

上式で定まる等価点音源と受音点の距離を l , 坑口端による回折減衰量を L_D とすれば音圧レベルは,

$$SPL = PWL - 8 - 20 \log_{10} l - L_D \dots \dots \dots (19)$$

として求めることができる.

無指向性音源に対する式(13)と式(19)とによる坑口からの放射指向性状を比較してみると 図-14 に示すような結果となる. トンネル内の音源位置によって若干違いがあるもののよく対応している. 壁面吸音率が大きく音源が坑内深くにあるとき, すなわち音の坑内伝播中に吸音減衰が大きくなるときには式(13)と式(19)の計算値に相違が少しみられるが相対音圧レベルの値から考えると問題ない量といえる. 逆にトンネル内での吸音減衰量が小さいときはよく一致する傾向にある. 式(18)において $\bar{\alpha}, \bar{\alpha}_f \rightarrow 0$ のときには $z_s' \rightarrow 0$ となり等価点音源は坑口位置に近づき, $\bar{\alpha}, \bar{\alpha}_f \rightarrow 1$ のときには $z_s' \rightarrow$

z_s となり実音源位置に漸近する.

5. 実用設計式の提案と適用性

トンネル坑口部周辺における道路交通騒音の予測は現行の法令, 基準などに準拠して中央値で評価し, その指標で予測するために, 道路計画, 設計などで一般に用いられている等間隔モデルを用いることにする¹³⁾. このモデルは, 音響パワーの等しい無指向性点音源とみなした自動車が一列に等間隔で等速走行していると仮定して導かれたものであり, 次の式で表わされる中央値 L_{s0} が広く実用に供されている.

$$L_{s0} = PWL - 8 - 20 \log_{10} l_a + 10 \log_{10} \left(\pi \frac{l_a}{d} \tanh 2\pi \frac{l_a}{d} \right) + \alpha \dots \dots (20)$$

ただし, PWL: 1 台の車から発生する騒音の A 特性による平均パワーレベル (dB(A)), l_a : 車線から受音点までの距離 (m), d : 平均車頭間隔 (m), α : 回折や沿道の地表条件など種々の原因による補正值 (dB(A)).

ところでトンネル坑口部周辺の騒音を予測する場合には音響エネルギー的に考えて, トンネル外の開放部において自動車から伝播する音 L_0 とトンネル内部から坑口を通して放射される音 L_T とに分けて計算し, それらを合成することにより騒音レベル L を算出する必要がある.

$$L = 10 \log_{10} (10^{L_0/10} + 10^{L_T/10}) \dots \dots \dots (21)$$

上式の L_0 に式(20)を適用する際には, 図-

15 に示されるように, 道路開放部の長さを勘案しなければならず, 受音点 A からの見通し角度 β を用いて補正する方法¹⁴⁾を採用する. すなわち,

$$L_0 = L_{s0} + 10 \log_{10} \beta / \pi \dots \dots \dots (22)$$

次に L_T についてはトンネル内に存在する n 台の自動車からの騒音レベル L_i を合成することにより得られる. 中央値が与えられるように 図-15 に示す配置で等間隔に自動車が並べられているときに,

$$L_T = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) \dots \dots \dots (23)$$

$$L_i = PWL - 8 - 20 \log_{10} l_i - L_{Di} \dots \dots \dots (24)$$

ただし, l_i は i 番目の自動車に関する等価点音源から受音点までの距離 (m), L_{Di} は坑口端部などによる回折減衰量 (dB) で式(14)による. 等価点音源の換算については式(18)により個々の自動車 O_i ごとに坑口からの距離 z_{oi}' が求められる. すなわち, 図-15 の記号

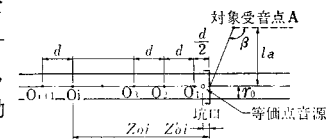


図-15 トンネル内の車両配置と見通し角

を用いて、

$$z_{oi}' = r_0(1 - A_{Ti}) / \sqrt{1 - (1 - A_{Ti})^2} \dots\dots\dots (25)$$

$$A_{Ti} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha}(1 - \bar{\alpha})^m z_{oi}}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + z_{oi}^2}} \dots\dots\dots (26)$$

式(26)により係数 A_T を算出する場合、トンネル壁面の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ を決定しなければならない。吸音処理のない従来のトンネル内距離減衰の実測例によると減衰量を $a x^{1/2}$ (x :音源からの距離)の形で表わされ $a = 0.4 \sim 0.5$ の値が得られている¹⁾。土木研究所の実大トンネルを利用して測定してみると $a = 0.35 \sim 0.47$ の値が測定された。そこでこの実験式と式(26)による距離減衰を比較してみると 図-16 のようになり、通常トンネルではそれから $\bar{\alpha} = 0.02$ 程度の値を用いることができると判断できる。なお、吸音処理を施したトンネルについては吸音材の性能や処理面積を勘案して設定する必

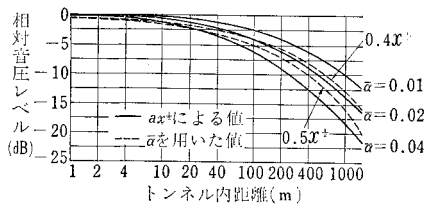


図-16 道路トンネル内の距離減衰

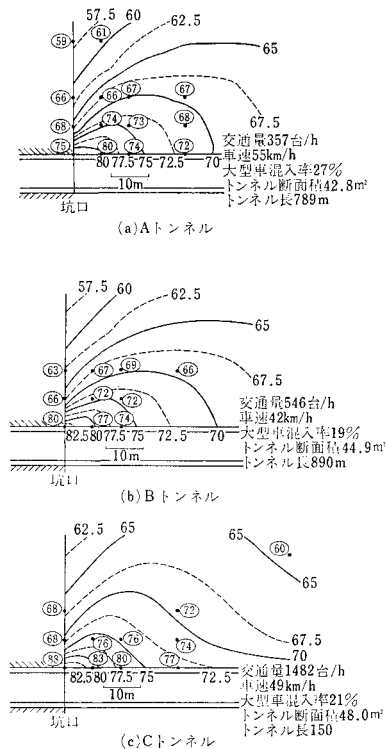


図-17 道路トンネルにおける実測との対比 (○内は実測値)

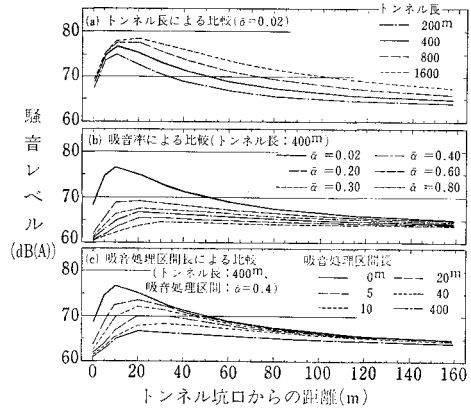


図-18 トンネル坑口部の騒音距離減衰 (トンネル半径: 5.5 m, 受音点位置: 路肩から 10 m, 交通量: 1 600 台/h, 大型車混入率: 15%, 車速: 50 km/h)

要がある。

上記の計算手法の適用性を判断するために供用中の道路トンネルにおいて測定した結果を用いて比較してみた。回折計算に用いる騒音の代表周波数に実測例を参照して 500 Hz とした結果を 図-17 に示す。図-17 よりトンネル周辺の道路交通騒音実測値と計算値とを完全に一致させることはもとより難しいが、結果はおおむね適合しているといえ、予測に必要な程度の成果が十分に得られているとみなし得る。

また、図-18 は本計算手法を用いてトンネル坑口部周辺の騒音分布を検討したもので、トンネル長、壁面吸音率などをパラメーターとして、道路近傍におけるトンネル坑口からの距離減衰性状を示している。坑口部周辺の騒音はトンネル長が長く吸音率が小さいほどレベルが大きく、一般にいわれていることと合致している。なお、式(26)の適用に際してトンネル内距離減衰量 ΔL_T の算出が実験などによって与えられているときには、式(26)を用いる代わりに、 $A_T = 10^{-\Delta L_T/10}$ として式(25)が適用できる。

6. 結 語

本文では、まずトンネル内を伝播する音の性状をトンネル内の距離減衰という形で調査し、ついでそれが坑口から周辺に放射される状態について検討した。この特性はいずれも無響室を利用した模型実験で検証され、その結果から解析方法の妥当性が証されている。さらに、実際のトンネルに適用しやすいように等価な点音源を坑口近くに設定しそれから放射されると考え、トンネルを含めた現地での道路交通騒音の予測に適應するように拡張している。最終的に現地実測結果と対比してモデルとし

てとりまとめたものである。

以上の結果から本文では次のような結論を得ることができる。

(1) トンネル内の伝播性状は音線として取り扱うことができ、減衰性状は音線の音響エネルギー的な和として導かれる式(10)で表わすことが可能である。これはトンネル模型実験結果により検証することができ、吸音処理のないトンネル内では距離減衰が非常に小さいといえる。

(2) トンネル坑口からの放射についても同様に扱うことが可能で、式(13)により放射指向性状を示し得る。模型実験との比較からもわかるように、トンネル軸方向への音の指向性は吸音処理を強化することでより強く現われてくる。

(3) トンネル坑口からの音の放射指向性状は、トンネル内の減衰特性を考慮した式(18)で示される等価点音源からの放射で近似することができる。

(4) トンネル坑口部周辺における道路交通騒音の伝播については5.で述べた関係式を用いて中央値として計算することが可能である。この結果を実際のトンネル坑口で測定された値と対比してみると十分な成果が得られていると判断できる。

本文は現在の法律、基準などと照らし合わせて騒音の評価を中央値で取り上げ、それに適合するように予測手法をとりまとめているが、自動車の流れ自体も必ずしも等間隔ではなく^{15),16)}、それをシミュレーションという形で組み入れることに対して本文中で述べた式を応用することが可能である。

終わりに本課題を研究するにあたり土木研究所 田中敬一道路部長をはじめとして、交通環境研究室の各位および(株)総合技術コンサルタントの三宅龍雄氏にご助

力いただいた。末尾ながら感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 土木試験所第3研究部道路研究室：トンネル坑口付近の交通騒音について、第17回北海道開発局技術研究発表会資料、昭和49年2月。
- 2) 堀内浩三郎：トンネル騒音の特性について、第13回土木研究所研究発表会資料、昭和50年3月。
- 3) 山本照二：廊下に沿っての音圧分布について、日本音響学会誌、Vol. 17, No. 4, 昭和36年。
- 4) 久野和宏・池谷和夫：指向性騒音群が作る騒音分布について、日本音響学会誌、Vol. 33, No. 5, 昭和52年。
- 5) 建設省土木研究所道路部交通環境研究室：トンネル坑口周辺における騒音に関する実験結果、土木研究所資料、第1420号、昭和53年8月。
- 6) 足立義雄ほか：道路トンネル坑口周辺の騒音に関する実験、土木技術資料、Vol. 21, No. 2, 昭和54年2月。
- 7) 日本音響材料協会編：騒音対策ハンドブック、技報堂、昭和41年11月。
- 8) Macdonald, H.M.: A Class of Diffraction Problems, Proc. London Math. Soc., Vol. 14, 1915.
- 9) 前川純一：障壁(塀)の遮音設計に関する実験的研究、日本音響学会誌、Vol. 18, No. 4, 昭和37年。
- 10) Kurze, U.J. and G.S. Anderson: Sound Attenuation by Barriers, Applied Acoustics, Vol. 4, 1971.
- 11) 庄司 光・山本剛夫・中村隆一：街頭騒音とくに交通騒音に関する研究、日本音響学会誌、Vol. 19, No. 3, 昭和38年。
- 12) 石井聖光：道路交通騒音予測計算法に関する研究(その1)——実用的な計算式について——、日本音響学会誌、Vol. 31, No. 8, 昭和50年2月。
- 13) 日本道路協会：道路環境整備のための手引、昭和51年4月。
- 14) 野中 宏：有限長遮音壁の減音効果、土木技術資料、Vol. 17, No. 6, 昭和50年6月。
- 15) 佐々木綱：交通流理論、技術書院、昭和48年。
- 16) 毛利正光・高田 弘：道路交通流の新しいモデルおよびその利用について、土木学会論文集、第137号、昭和42年1月。

(1983.3.30・受付)