

土 木 研 究 所 資 料

トンネル坑口部周辺における道路交通騒音の伝播

昭 和 57 年 6 月

土木研究所道路部
交通環境研究室

序

道路トンネル坑口からの騒音伝播については、従来より次の2つの報告書を参考として検討が行われている。

土木研究所資料 第1420号, トンネル坑口周辺における騒音に関する実験,
昭和53年8月

土木技術資料 Vol.21 No.2, 道路トンネル坑口周辺の騒音に関する実験,
昭和54年2月

本報告書は、これらの結果をさらに展開させて理論的な面からも、実験、実測の面からも、より一層の研鑽を加えて、現段階における最終的な成果としてとりまとめたものである。

道路トンネル坑口から放射される自動車の騒音予測に対する一助ともなれば幸甚である。

昭和57年6月

交通環境研究室 足立 義雄

目 次

1. ま え が き	1
2. 基本的考え方と関係式	1
3. 実験データによる検証	5
4. 近似的手法への変換	8
5. 実用設計式の提案と適用性	9
6. 結 語	12

1. ま え が き

我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数年程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。その中のひと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。そのときにトンネルの形状から考えて指向性が強いものと予想される。

この課題は道路工学と音響学の中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全く異質な性格のものである上に、感覚が個人的にちが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⁾、音源の指向性を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騒音分布を対象としているものは未だない。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想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。

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。以上の検討結果にもとず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うる実用的な手法を提案したものである。

2. 基本的考え方と関係式

問題を簡単にするために、以下に示すような考え方に従ってトンネル内およびその周辺における騒音特性を調べることにする。

- ① 道路交通騒音が中央値として予測される場合には、現在のところ等間隔モデルが実用的にまとめられ、一般に利用されている⁵⁾⁶⁾。このモデルは音響的に等しいパワーを有する自動車が一列に等間隔で走行しているという仮定に基づくものである。実際の自動車交通は道路上を不規則に走行しており完全に満足しえないが、多数の自動車が走行しているときにはこの考え方が適用できると考えられる。道路交通騒音が問題として取り上げられるのはある一定台数以上の

自動車が行走している場合が多いので、ここでもこの仮定に従い、等パワーの無指向性点音源に変換し、等間隔で配列されているという考え方を採用する。

- ② 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ものとする。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源は光に対する鏡面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⁾。

(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向に反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。

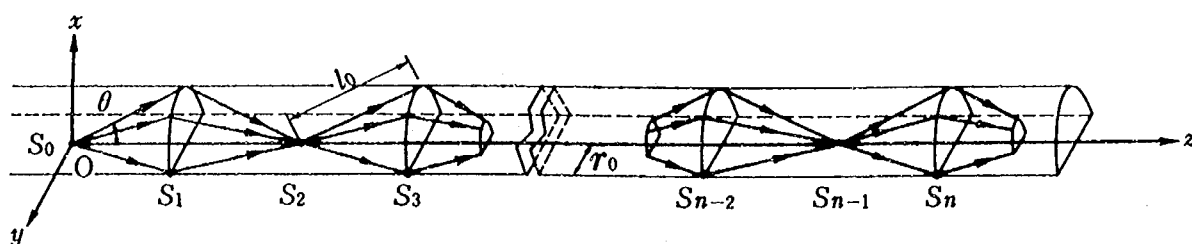


図-1 トンネル内の音の伝播

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 $l_0 = r_0 / \sin \theta$ 進む毎に反射される。このとき、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、音源から角度 θ の半円錐状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図-2に示されるような ray tube 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 の断面積 A_0 と経路長 l での断面積 A との比によって与えられる。

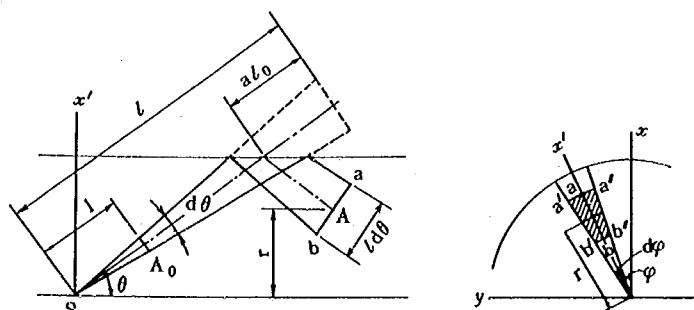


図-2 ray tube

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

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、

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

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

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。

$$\Delta L = 20 \log_{10} l_0 + \begin{cases} 10 \log_{10} (1-a)(n+a) : n \text{ が奇数のとき} \\ 10 \log_{10} a(n+a) : n \text{ が偶数のとき} \end{cases} \quad (4)$$

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 $l/l_0 = 2, 4, 6 \dots$ の位置で無限大の音圧レベルに近づき、また同一の r を持つ受音位置 ($l/l_0 = 1, 3, 5 \dots$ の位置) 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理論的には有している。

ray tube の形は一般には四辺形であるが、反射点近傍においては四辺形と異なってくる。それを厳密に検討すると、 $l/l_0 = 1, 3, 5 \dots$ の位置である半円形断面での反射点近傍では、

$$\Delta L = 10 \log_{10} (r_0 - l \cos \theta \cdot d\theta/4) l / \sin \theta \quad (5)$$

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

$$\Delta L = 10 \log_{10} (l \cos \theta \cdot d\theta/4) l d\theta d\varphi \quad (6)$$

である。したがって、ray tube の角度 $d\theta, d\varphi$ により ΔL の値は定まり、微少にとることにより式(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 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。

$$l_n = \begin{cases} \sqrt{\{(n+1)r_0 - r\}^2 + z^2} : n \text{ が奇数のとき} \\ \sqrt{(nr_0 + r)^2 + z^2} : n \text{ が偶数のとき} \end{cases} \quad (7)$$

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

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)より次のようになる。

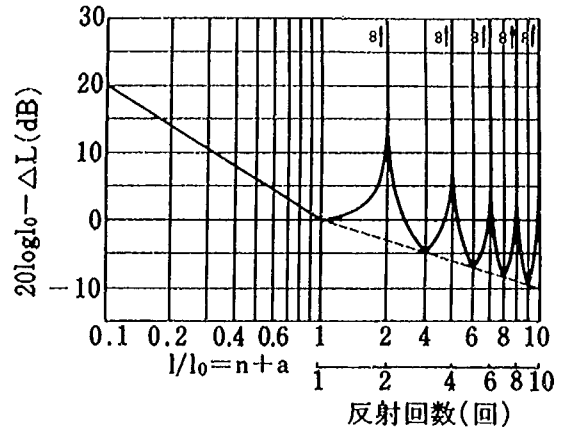


図-3 音線に従った距離減衰性状

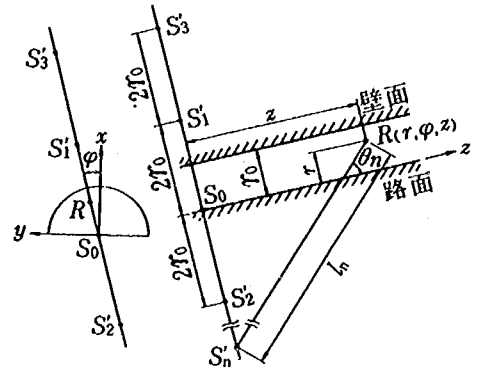


図-4 トンネル内にある受音点 R の状態

$$SPL = PWL - 8 + 10 \log_{10} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(1-\bar{\alpha})^m (1-\bar{\alpha}_l)^m \sin \theta_{2m}}{r l_{2m}} Q(\theta_{2m}) \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(1-\bar{\alpha})^{m+1} (1-\bar{\alpha}_l)^m \sin \theta_{2m+1}}{r l_{2m+1}} Q(\theta_{2m+1}) \right] \quad (9)$$

ただし、PWL は音源のパワーレベル、 $\bar{\alpha}$ はトンネル壁面の平均吸音率、 $\bar{\alpha}_l$ は路面の平均吸音率を表わし、式(9)では音の指向性として音源の θ 方向の指向係数を $Q(\theta)$ としており、無指向性のときには $Q(\theta) = 1$ となる。 m は整数である。これより坑口から放射される平均音圧レベルは $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_l = 0$ のとき、 $SPL = PWL - 10 \log_{10} 2S$ (S : トンネル坑口の断面積) という簡単な形で表現が可能となり、ある音響出力の点音源がトンネル内に存在するときに坑口断面積が大きい程平均音圧レベルは小さくなるという性質と一致する。

(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ってくる。奇数回反射された S_{2m+1} からの音線は仮想音源 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、受音点 R が三角形 PP_0P_1 の範囲に存在する場合に到達する。偶数回反射されたときには S'_{2m} からの音は $P-P_1$ 面 (ただし、 P_1 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、坑口周辺部の音圧レベルは式(9)と同様に次式で与えられる。

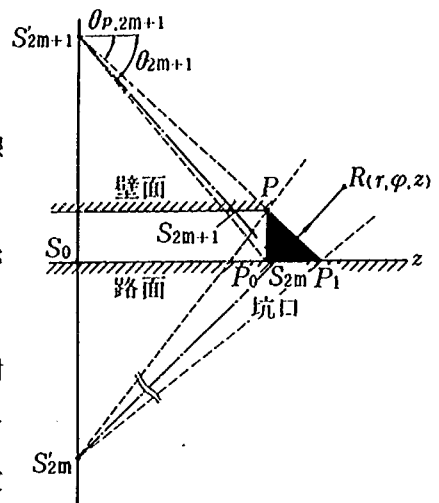


図-5 トンネル外にある受音点 R の状態

$$SPL = PWL - 8 + 10 \log_{10} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \frac{(1-\bar{\alpha})^m (1-\bar{\alpha}_l)^m \sin \theta_{2m}}{r l_{2m}} Q(\theta_{2m}^*) \cdot 10^{-L_D/10} \right. \\ \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(1-\bar{\alpha})^{m+1} (1-\bar{\alpha}_l)^m \sin \theta_{2m+1}}{r l_{2m+1}} Q(\theta_{2m+1}) \cdot C_{2m+1} \right] \quad (10)$$

ここで、 L_D は音源 S_{2m} に対応する回折減衰量であり、係数 C_{2m+1} は音源 S_{2m+1} から受音点を見通せるとき、すなわち $\theta_{2m+1} \geq \theta_{p,2m+1}$ かつ $r \leq r_0$ のときに 1 であり、それ以外の場合については 0 である。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うる P または P_1 を見込む方向の指向係数によるものと判断できる。

式(10)を用いて坑口周辺部の音圧レベルを求めるためには、式(10)に含まれている L_D を推定することが必要となる。一般に回折減衰の算定方法には種々の理論式や実験式が既に発表されているが、ここでは実用的な面を重視して Kurze らが提案した回折減衰量 L_D で定めることとする。

$$I_D = 5 \pm 20 \log_{10} \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \quad (11)$$

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。

3. 実験データによる検証

(1) 模型実験方法¹¹⁾¹²⁾

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180m³、内寸法：7m×5m×5m、暗騒音：16dB(A)、30dB(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290mm、側壁立上り高さ50mm、全高201mmの図-6

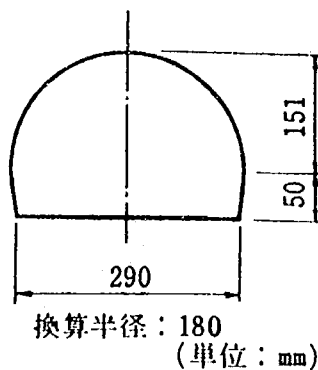


図-6 模型トンネル

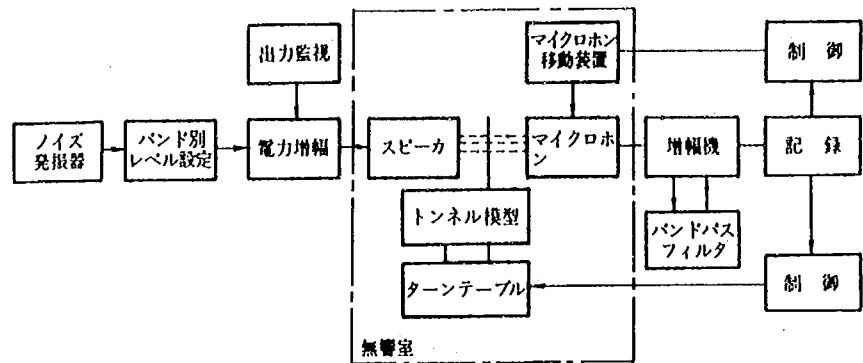


図-7 実験の流れ

に示すような断面で、厚さ10mmのアクリル材で製作している。

実験音としては、ツィータから放射される一定周波数を中心とす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ィ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に示すようなパワーレベル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 $Q(\theta)$ としてそれを考慮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（平均吸音率は8.16 KHzのオクターブバンドノイズに対して0.98、ワイドノイズ

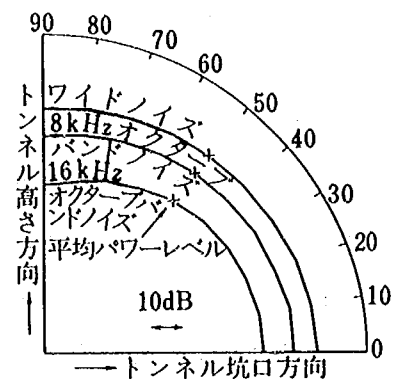


図-8 音源の指向性

に対して 0.87) を用いて吸音処理を行い、 $\bar{\alpha}$ が存するときの音圧分布をも測定して検証している。

(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 18 cm)に換算して実験値との比較を行う。音圧レベルの計算に当っては式(9), (10)に含まれた無限級数を計算しなければならないが、音源位置に拘らず坑口断面を通過する音響エネルギーが一定となるように考えて決定し、音源からの音の放射角度との関係から放射角度を最大 $\theta_{\max}$ まで考慮することにより $M = (Z \tan \theta_{\max} - r_0) / 2r_0$ 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した結果がワイドノイズに対して図-9である。測定結果とともに式(9)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距離の逆二乗則に従って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。

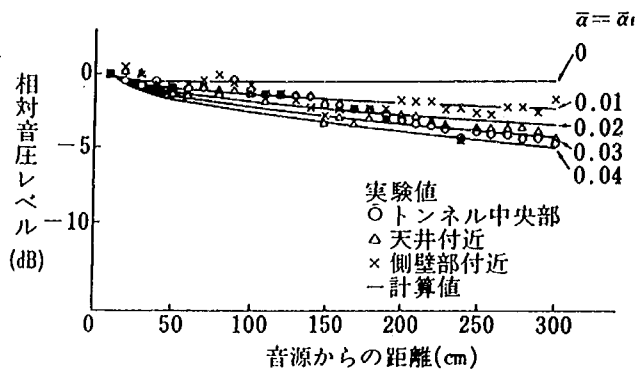


図-9 トンネル内距離減衰
(音源にワイドノイズ使用)

計算結果との比較ではアクリル材にもわずかな吸音性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 程度と考えることで説明することが可能となり、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斉合している。したがって、トンネル内で音の多重反射を考えた式(9)が有用であるといえる。その他の実験結果も同様である。

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、天井の一部を吸音処理した場合、側壁の一部を吸音処理した場合および全

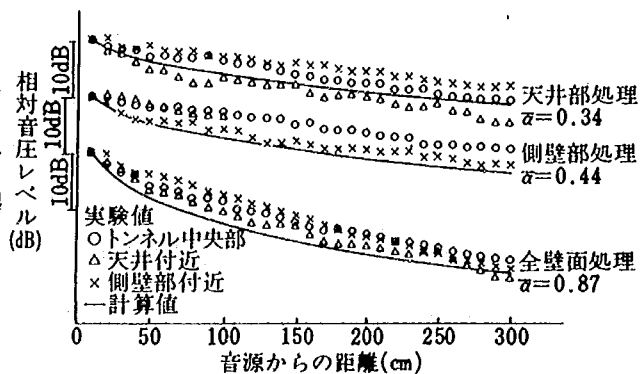


図-10 吸音処理時のトンネル内距離減衰
(音源にワイドノイズ使用)

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。式(9)を用いて解析するときには吸音処理部の範囲を忠実に導入することが望しいが、模型実験ではそこまで細かに合致させることがむずかしいので、平均的な吸音率に換算して式(9)で計算を行っている。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 $\bar{\alpha}$ を設定している。したがって、解析結果は実験結果と若干条件が異なっているがほぼ一致しており、本解析法は妥当であると思われる。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。これは吸音処理の形状が異なってもある程度の伝播距離を有すると乱反射によって拡散音場的な傾向が強まり、実験値と計算値の減衰曲線が合致するようになるものと考えられる。その他の実験結果も同様である。

b) トンネル坑口からの放射性状

受音点を坑口中心から扇状に配置して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16KHzのバンドノイズに対する実験結果を式(10)による計算値と共に、PWL=0dBとして相対音圧レベルでまとめたものが図-11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表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、吸音処理された場合ほどトンネル軸方向に音が放射されている。

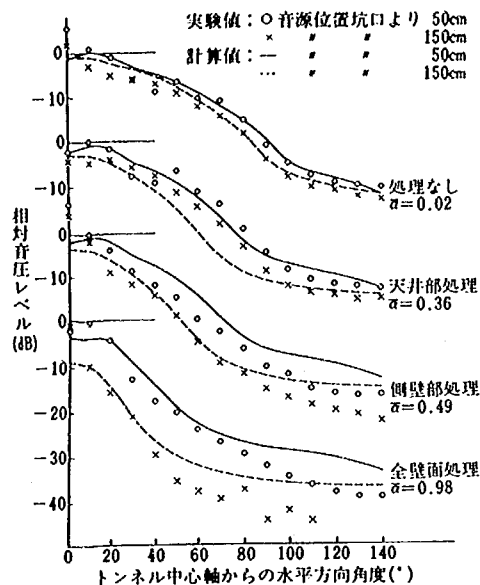


図-11 トンネル坑口からの放射指向性状
(16KHz オクターブバンドノイズ)

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。しかも坑口前方40度以内の範囲ではよく合っているが、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実験値の音圧レベルが大きくなる傾向が見受けられる。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、坑口端部が吸音性状を有する障壁のような作用をし、受音角度が大きくなるにつれて剛な障壁として解析された計算値の音圧レベルよりも実験値での減音量が増大するものと推察される。その他の実験についても同様である。

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斉合しており、式(10)が十分な適合性を有しているものと思われる。

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(9)(10)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きには、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ことを工夫する。すなわち、ここで論じる近似的手法は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て、坑口近くのトンネル内の位置に置き、ひとつの点音源から坑口外へ伝播放射するという方法である。図-11を見るとトンネル軸方向への指向性が強いことは既に述べたが、この指向性状を利用し、ひとつの等価点音源をトンネル内の適宜な位置に置き、その等価音源にトンネル内の伝播性状を含め、それからの放射指向性状で近似するという考え方に基づいている。この方法によると、坑口の外側に障壁などがあり、その減音効果を組入れる場合にも容易に計算することが可能となる。

等価音源の決定に当っては等価音源がトンネル内の実音源と同じパワーレベルを有し、その置換位置はトンネル内の実音源によって坑口から放射される音響パワーと等価音源による坑口放射パワーが一致するように考えるとよい。このときに道路交通騒音を対象とすると無指向性点音源とみなすことができる。

いま、トンネル坑口から z_s の距離にある音響出力の 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(7)~(9)を用いて次のように表わされる。

$$W_T = 10^{-12} \int_0^{r_0} \pi r 10^{\frac{SPL(r)}{10}} dr = \frac{W}{2} \left(1 - \sum_{m=1}^{\infty} \bar{\alpha}_f (1-\bar{\alpha})^m (1-\bar{\alpha}_f)^{m-1} \cdot \frac{z_s}{\sqrt{(2m r_0)^2 + z_s^2}} - \sum_{m=0}^{\infty} \bar{\alpha} (1-\bar{\alpha})^m (1-\bar{\alpha}_f)^m \frac{z_s}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + z_s^2}} \right) \quad (12)$$

ただし $SPL(r)$ は式(9)における SPL の坑口方向に放射される成分を示している。路面における吸音性状を無視すると $\bar{\alpha}_f = 0$ より

$$W_T = \frac{W}{2} \left(1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha} (1-\bar{\alpha})^m z_s}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + z_s^2}} \right) \quad (13)$$

一方、等価点音源を坑口から距離 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。

$$W'_T = \frac{W}{2} \int_0^{r_0} \frac{r s}{(r^2 + S^2)^{3/2}} dr = \frac{W}{2} \left(1 - \frac{S}{\sqrt{r_0^2 + S^2}} \right) \quad (14)$$

式(13)と式(14)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 S は次のように定められる。

$$S = r_0 F / \sqrt{1 - F^2}$$

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

(15)

無指向性音源に対する式(10)と式(15)とによる坑口からの放射指向性状を比較してみると図-12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(10)と式(15)の計算値に相違が少し見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

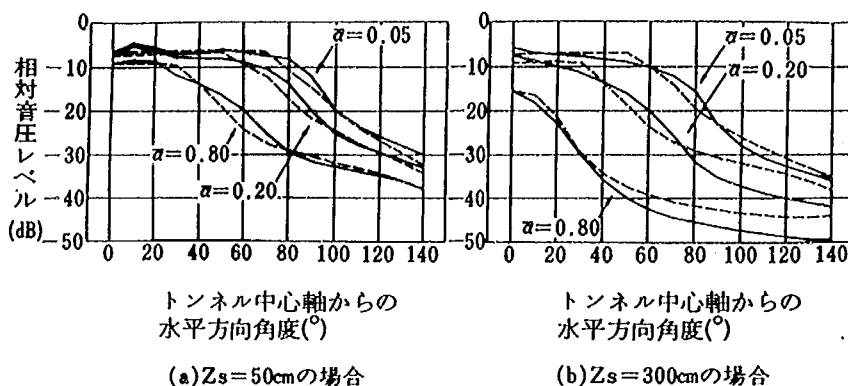


図-12 式(10)と式(15)による計算値の比較 (PWL=0 dB, $r_0=18$ cm)
(実線は式(10)による計算値, 点線は式(15)による計算値)

さいときにはよく一致する傾向にある。式(15)において $\bar{\alpha} \rightarrow 0$ のときには $S \rightarrow 0$ となり等価音源は坑口位置にあり、 $\bar{\alpha} \rightarrow 1$ のときには $S = z_s$ となり実音源と同一位置となる。

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、規準などに準拠して中央値で評価し、2でも述べたように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にここでもよることとする。¹³⁾ すなわち、トンネル外の開放部分においては道路が無限に続いているものとして次の式で表わされる中央値 L_{50} が広く実用に供されている。

$$L_{50} = \text{PWL} - 8 - 20 \log l_a + 10 \log_{10} \left(\pi \frac{l_a}{d} \tanh 2\pi \frac{l_a}{d} \right) + \alpha \quad (16)$$

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))。

ところで音響パワーの等しい無指向性点音源とみなした自動車等が等間隔、等速度で坑口部周辺を走行しているときには、トンネル外の開放部分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。(図-13)。

$$L_i = 10 \log_{10} (10^{L_{0i}/10} + 10^{L_{\tau i}/10}) \quad (17)$$

図-13における L_0 に式(16)を適用する際には、道路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 β/π で音響エネルギーを補正する方法が提案されており、¹⁴⁾ここでもそれを採用する。すなわち、

$$L_0 = L_{s0} + 10 \log_{10} \beta/\pi \quad (18)$$

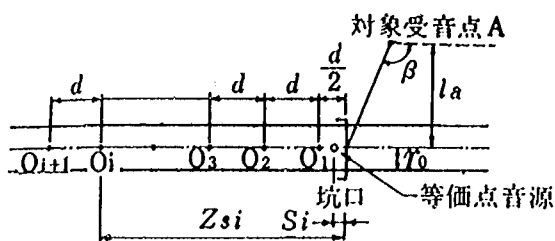


図-13 トンネル内の車両配置と見通し角

次に L_{τ} 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-13に示す配置で等間隔に自動車が並べられているときに、

$$L_{\tau} = 10 \log_{10} \left(\sum_i^n 10^{L_i/10} \right) \quad (19)$$

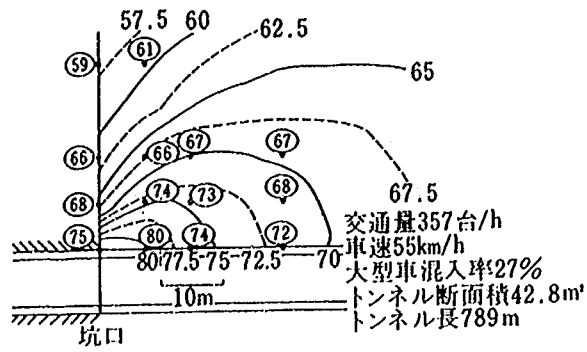
$$L_i = \text{PWL} - 8 - 20 \log l_i - \Delta L_i \quad (20)$$

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)、 ΔL_i は坑口端部などによる回折減衰量 (dB) で式(11)による。等価点音源の換算については式(15)により個々の自動車 O_i 毎に坑口からの距離 S_i が求められる。すなわち、図-13の記号を用いて、

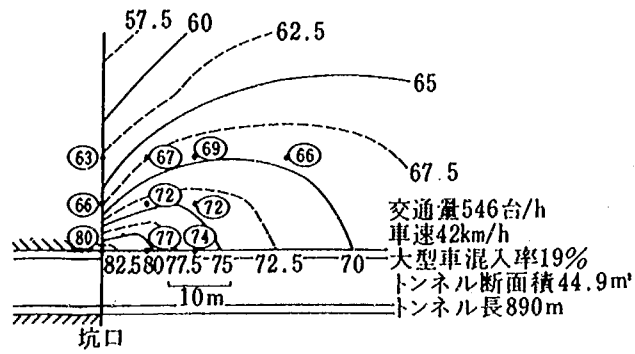
$$\left. \begin{aligned} S_i &= r_0 F_i / \sqrt{1 - F_i^2} \\ F &= \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha} (1 - \bar{\alpha})^m z_{si}}{\sqrt{(2m+1)^2 r_0^2 + z_{si}^2}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

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検討してみた。結果を図-14に示す。図-14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むずかしいが、結果は概ね適合していると言え、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うる。

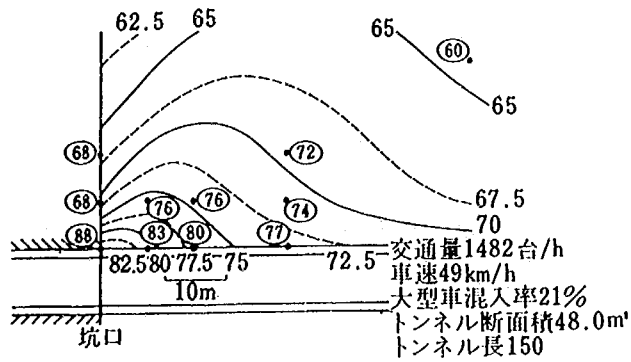
図-14においてトンネル壁面の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ としては、従来のトンネル内距離減衰の実測例から類推し、文献1)によると減衰量を $ax^{1/2}$ (x : 音源からの距離)の形で表わすと $a=0.4 \sim 0.5$ の値が得られている。土木研究所の実大トンネルを利用して測定してみると $a=0.35 \sim 0.47$ の値が測定された。そこで距離減衰を比較してみると図-15のようになり、通常のトンネルではそれから $\bar{\alpha}=0.02$ 程度の値を用いることができると判断したものである。なお、吸音処理を施したトンネルについては吸音材の性能や処理面積を勘案して設定する必要がある。回折計算に用いる騒音の代表周波数は実測例を参照して500 Hzを使用している。



(a) A トンネル



(b) B トンネル



(c) B トンネル

図-14 道路トンネルにおける実測との対比 (内は実測値)

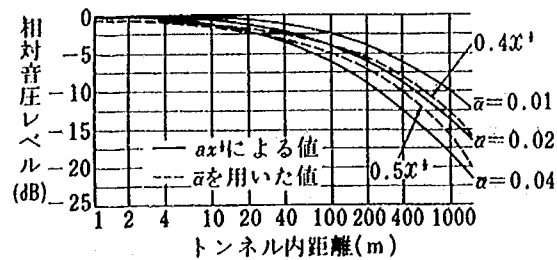


図-15 道路トンネル内の距離減衰

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用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(9)で表わすことが可能である。この性状は実際の音源と同じパワーレベルを有しトンネル坑口近くに設定する等価点音源に近似的に置換することができ、式(15)のような簡単な形に変換することができる。
- (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(10)により放射指向性状を示しうる。これは等価点音源からの放射でほぼ一致させることができる。
- (3) 無響室内のトンネル模型実験結果により、式(9)、(10)を検証することができたが、トンネル内の減衰は非常に小さく、かつトンネル坑口から放射させるときには非常に指向性が強くなり、トンネル中心軸方向に主として伝達される。この傾向は吸音処理することにより一層強く表われてくる。
- (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、規準などと照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方法を取りまとめているが、自動車の流れ自体も必ずしも等間隔ではなく、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で述べた式を応用することが可能である。

終りに本課題を研究するに当たり土木研究所田中敬一道路部長を始めとして、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担当者に御助力いただいた。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) 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。
- 6) 石井聖光：道路交通騒音予測計算方法に関する研究（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。
- 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) H.M. Macdonald : A Class of Diffraction Problems, Proc. London Math. Soc., Vol.14、1977。
- 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) U.J. Kurze and G.S. Anderson : Sound Attenuation by Barriers, Applied Acoustics, Vol.4、1971。
- 11) 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。
- 12) 足立義雄他：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。
- 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。

トンネル坑口部周辺における
道路交通騒音の伝播

ISSN 0386-5878
土研資料 第1845号
昭和57年7月(1982)
足立 義雄

キーワード 道路交通騒音、模型実験、道路トンネル

要旨 トンネル坑口部からの道路交通騒音の伝播は、トンネル内を走行する自動車からの音が集積されたような形で、坑口から放射される。この現象に理論面と実験、実測面から検討を加え、道路トンネル坑口部周辺における騒音レベルから予測できうる実用的な手法を提案したものである。



郵便はがき

305-□□

40円切手
をはって
下さい。

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所

交通環境研究室 御中

No. 5



土木研究所資料第1845号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

