

論文 鉄道のトンネル坑口周辺部における 騒音予測手法の検討

小方 幸恵¹・北川 敏樹²

¹正会員 鉄道総合技術研究所 環境工学研究部騒音解析研究室（〒185-8540 東京都国分寺市 2-8-38）

E-mail: ogata.yukie.96@rtri.or.jp

²鉄道総合技術研究所 鉄道国際規格センター

鉄道のトンネル坑口周辺部では、明かり区間で実施される対策では十分な騒音低減効果を得られない場合もあるため、トンネル坑口周辺部に対応した騒音予測手法および対策手法が必要である。そこで、トンネル坑口周辺部における沿線騒音の予測精度を既存の手法より更に向上させることを目的として、現地試験および音響模型試験を実施した。これらの試験結果を再現可能な手法として、車体による音の遮蔽の影響と音源の指向特性の影響を考慮した予測モデルを提案した。またこの手法を用いて、トンネル坑口周辺部における騒音対策の評価を行った。

Key Words: Shinkansen wayside noise, noise from tunnel section, prediction model of railway noise

1. はじめに

鉄道沿線における環境保全は、重要な課題のひとつである。トンネル坑口周辺部における沿線騒音についても例外ではなく、予測手法および対策の検討が行われてきた¹⁾²⁾。これらの検討の中で、長大編成の鉄道がトンネル坑口付近を走行するとき、音源となる車両がトンネル内外ともに存在するため、通常の見当り区間の場合と比較して沿線騒音が大きい場合があることが示された³⁾⁴⁾。これは、トンネル外の明かり区間の車両から発生した音（明かり部音）にトンネル内の車両から発生しトンネル坑口から放射された音（トンネル坑口音）が加わるためである。したがって、鉄道のトンネル坑口周辺部では、明かり区間用の対策だけでは、必ずしも騒音低減効果が十分ではない場合がある。すなわち、トンネル坑口周辺部における騒音対策を効率よく検討するためには、明かり部音とトンネル坑口音のそれぞれの寄与について評価する必要がある。

トンネル坑口周辺部における沿線騒音をより精度よく予測する手法を構築することを目的として、現地試験および音響模型試験を実施した。本稿では、これらの試験結果と、これらに基づいて検討したトンネル坑口周辺部の騒音の予測手法について述べる。この手法では既存の手法⁵⁾を踏襲して、トンネル坑口周辺部における沿線騒音を、明かり部音とトンネル坑口音の和としている。ま

たトンネル坑口音は、トンネル内壁で反射しない成分である直達音とトンネル内壁で反射する成分であるトンネル反射音の和としている。本稿でのモデルでは、既存の手法をもとにトンネル反射音に車体による音の遮蔽の影響³⁾と指向特性⁴⁾を新たに考慮する。このモデルを用いた予測結果を音響模型試験での結果と比較することにより、予測手法の妥当性を評価する。またトンネル坑口周辺部の騒音対策として防音壁のかさ上げと吸音材貼付、トンネル内壁の吸音材貼付を取り上げ、予測モデルを用いてその低減効果を評価する。

2. トンネル坑口周辺部の騒音分布

(1) 現車試験による評価

トンネル坑口周辺部における沿線騒音に対する明かり部音とトンネル坑口音の寄与度を評価することを目的として、現車試験による騒音測定を実施した。軌道条件や構造物条件等を以下に示す。

軌道条件：スラブ軌道

構造物条件：コンクリート高架橋

（高さ：G.L.～R.L.+8.7m）

防音壁条件：上り線側 直型R.L.+2.0m

下り線側 直型R.L.+2.23m

車両条件：新幹線車両 10両（250m）、270km/h

トンネル坑口にはトンネル緩衝工（鋼製）が設置されて

いる。緩衝工の開口部スリットは下り線側にはなく、上り線側に10箇所ある。

騒音測定は、柵外の上り線側と下り線側それぞれ30点程度の測定点を設置して実施した。主な測定範囲はまくり方向に軌道中心から0～50m、線路長手方向にトンネル緩衝工口（以下、トンネル坑口）から0～+100mである。マイクロホン（RION社製UC-30）の高さはすべて地上1.2mである。列車速度と列車位置は、上下線のレールに設置された車軸検知器から求めた。各測定点における結果では、同程度の速度（基準速度に対して $\pm 2.5\text{km/h}$ ）で走行する3本以上の列車に対応する結果を算術平均した。

図-1に、前述の条件で、列車位置に対応した騒音レベル分布（時間重み付け特性Fでの値）を示す。この図からわかることを以下にまとめる。

- ・列車全体がトンネル内にある場合（図-1(a)(b)）、トンネル坑口に対して45°程度の方向にトンネル坑口音が強く放射される。列車先頭部がトンネル坑口に近づくと、下り測線側でトンネル坑口から離れが20～30m程度、近接側軌道から離れが20～30m程度の範囲（X区域）を中心に騒音レベルが大きくなる傾向にある。列車先頭部がトンネル坑口に近づくと、このX区域を中

心に騒音レベルが大きくなる。

- ・列車先頭部がトンネルから退出した後（図-1(c)）では、X区域における騒音レベルは先頭部が退出した時より大きくなる。また、トンネルから退出する車両数が増えると、レール長手方向に騒音レベルが大きくなる領域が広がる傾向にある。これは、明かり部音による影響と考えられる。
- ・列車全体がトンネルから退出した場合（図-1(d)）、トンネル坑口音による影響は小さくなり、列車が在線する部分に対応した位置で騒音レベルが大きくなる。

(2) 音響模型試験による評価

鉄道総研内無響室での音響模型試験により、トンネル坑口周辺部における騒音分布の評価を行った⁹⁾。この試験では、トンネルを含む鉄道構造物、車両、音源およびマイクロホンを無響室内に設置し、音源から発生した音を1/4インチマイクロホン（B&K製、4939-L-002）を用いて測定した。模型の縮尺は1/25である。以下、表示寸法および周波数は特に明示しない限り現車換算値とする。車両下部音は音源のパワーレベルが大きい¹⁰⁾ため、トンネル坑口周辺部の騒音に対して支配的である。そこで、本試験の評価対象の音源は車両下部音とした。図-2に模

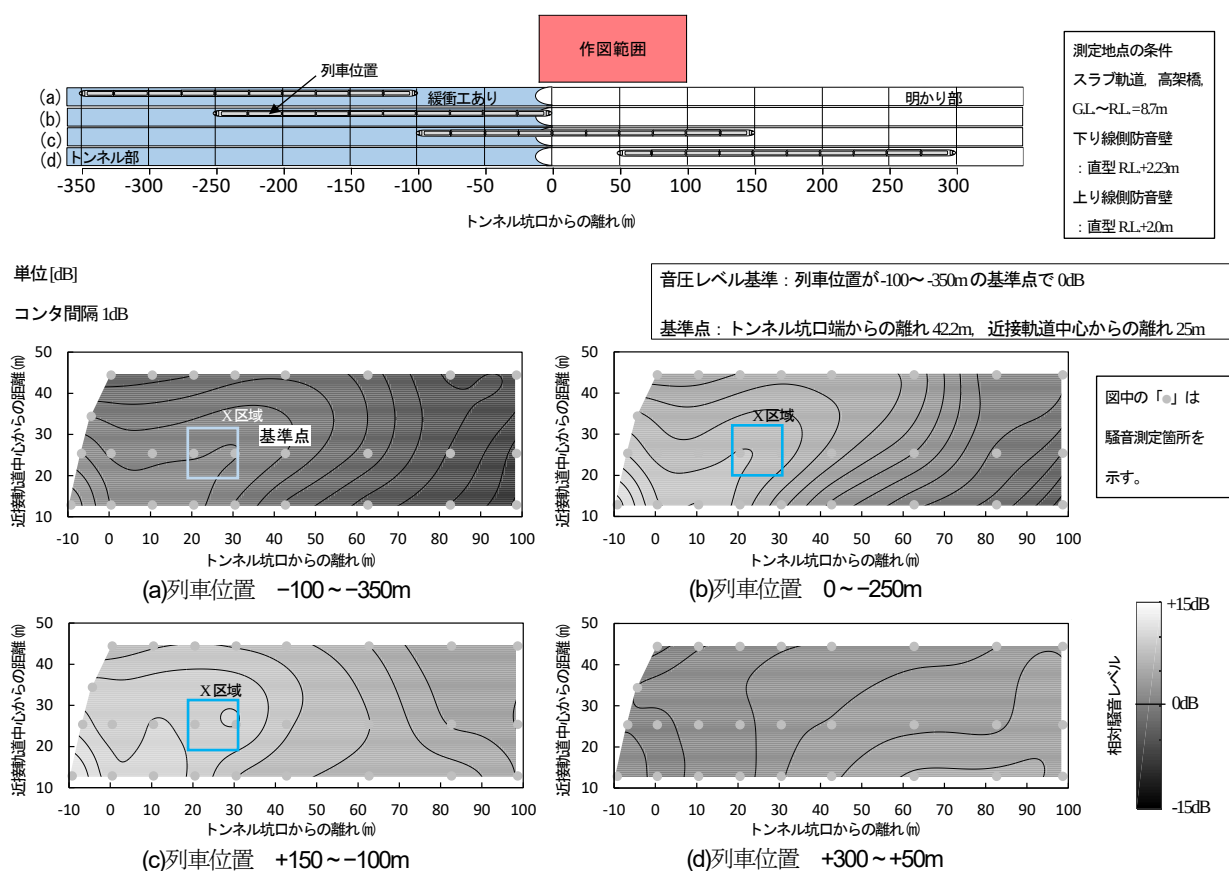


図-1 トンネル坑口周辺部の相対騒音レベル分布

（下り列車、10両 250m、270km/h、下り線側測定点、時間重み付け特性F、単位[dB]）

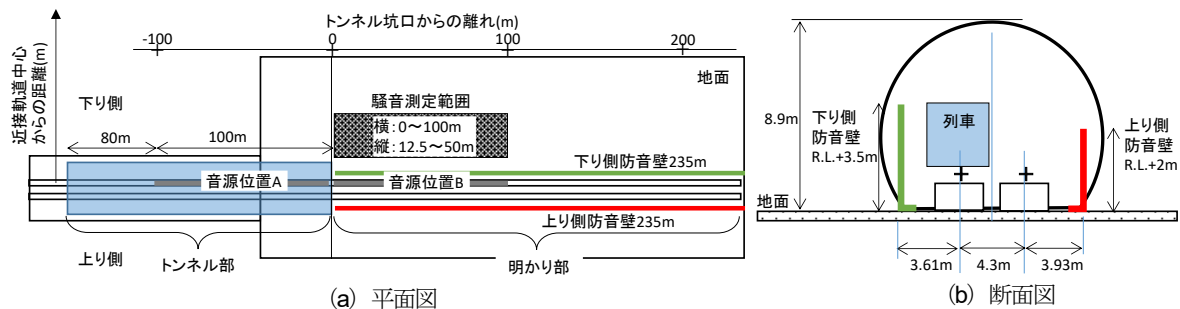


図-2 音響模型試験における模型設置位置および騒音測定範囲

表-1 音響模型試験の条件の概要

縮尺	1/25
音源	エアジェット一様有限長線音源 (1回の測定では100m分使用) 近接側車両の車両下部音の位置 (R.L., 軌道中心) に設置
構造物 条件	複線平地(素地) 区間, スラブ軌道, R.L.=G.L.+0.9m相当
防音壁 条件	直型防音壁: 下り側 (高さR.L.+3.5m) 上り側 (高さR.L.+2m)
測定点	トンネル坑口端から線路長手方向に 0~100mに12.5mピッチの9列, 近接軌道中心からまくらぎ方向に 12.5, 25, 50mの3列, $9 \times 3 = 27$ 点 高さ: G.L.から1.2m (マイクロホン水平・まくらぎ方向に車両に向けて測定)

型設置位置および騒音測定範囲を、表-1に本試験の条件の概要を示す。また、レール近傍（外側レールから2m, R.L.から0.4m高さの位置）で、測定データの現車換算用の騒音測定を別途行った。模型条件の簡単化のため、素地（平地）を対象とする。音源は図-2の音源位置A（線路長手方向にトンネル坑口端から-100mから0mまでトンネル内100m分）、音源位置B（同上0mから100mまで明かり部100m分、騒音測定範囲の正面）に別々に設置し、各々の設置条件で騒音を測定した。車両は線路長手方向に軌道全体を覆うように配置し、受音点に対して近接側（下り側）にあるものとする。

音響模型試験での測定データは、次の手順で現車換算する。①測定されたデータの1/3オクターブバンド周波数を1/25倍する。②実測値から空気吸収の影響を考慮した補正⁷⁾を行う。③模型試験と現車試験（列車速度260km/h）におけるレール近傍での騒音の周波数スペクトルの差を模型試験の結果から差し引くことにより、各測定点における現車に対応したレベルを求める。④上の③の63~4000Hzの各バンドのパワー和（O.A.値）を求める。

得られた結果を図-3に示す。音源長さは、トンネル内100m, 明かり部100mで合計200m（8両分）である。評価結果は、明かり部のみに音源（100m分）を置いたと

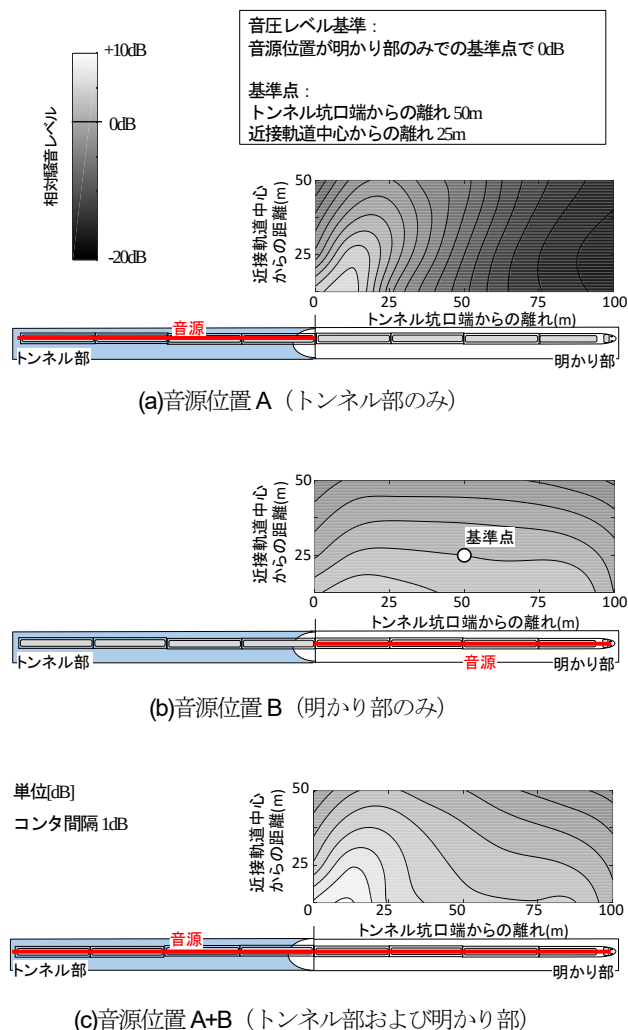


図-3 音響模型試験によるトンネル坑口周辺部の音圧レベル分布（近接側列車，O.A.値，単位[dB]）

きの基準点（トンネル坑口端から50m, 近接軌道中心から25m）における値を0dBとした。図-3からわかることを次に挙げる。

(a) 音源がトンネル内のみである場合には、トンネル坑口からトンネルの外の斜め前方へ等音圧レベル線の尾根を形成して音が強く放射される。その尾根よりトンネルから遠くなるにつれて騒音はやや緩やかに

小さくなるが、尾根よりトンネルに近くなると急激に小さくなる。

- (b) 音源が明かり部にある場合には等音圧レベル線は軌道とほぼ平行であり、まくらぎ方向の軌道からの距離が遠いほど騒音は小さい。

(1)節の現車試験と本音響模型試験では地面からレールまでの高さ、防音壁高さ等条件は異なるが、先の(a)と(b)に示す騒音分布の形状はほぼ同様である。

3. 沿線騒音の予測手法の検討

(1) トンネル坑口音の予測手法の概要

2章から、トンネル坑口周辺部では音源位置により騒音分布が異なること、トンネル坑口音は明かり方向の斜め前方へ強く放射されること等がわかった。そこで、これらを再現する沿線騒音の予測手法を検討する。ここでは既存の手法を踏襲し、トンネル坑口周辺部の沿線騒音は、明かり部音（トンネル外の音源からの音）とトンネル坑口音（トンネル内の音源からの音）の和とする。トンネル坑口音は、直達音とトンネル反射音の和とする。トンネル反射音の伝搬の予測については、明かり部に存在する車体による音の遮蔽の影響を考慮したモデル³⁾を採用する。また文献4)に示されたトンネル反射音の音源の指向特性を考慮した手法を導入する。この指向特性は、

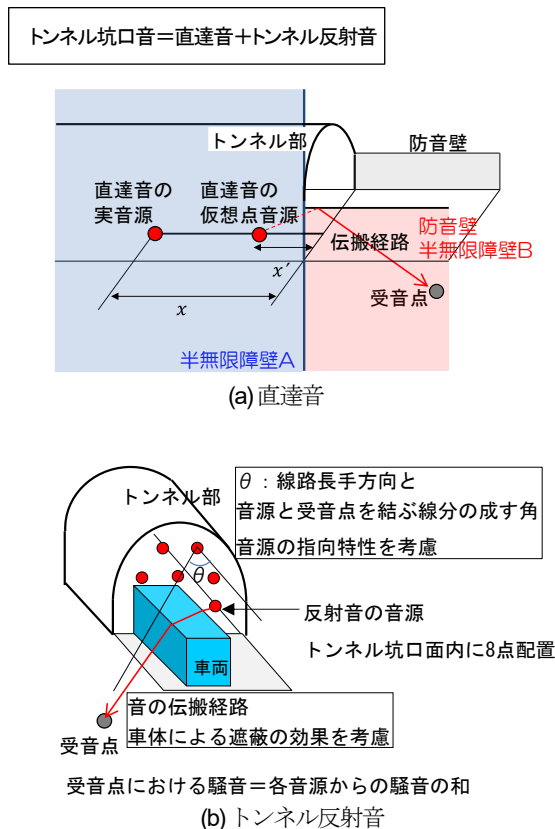


図4 トンネル坑口音の伝搬モデル

道路交通騒音の分野において行われた実験に基づくものである。ここでは、これら2点を組み合わせた新たなトンネル坑口音の予測手法を提案する。

トンネル坑口音 L_A は、トンネル内に存在する点音源から放射される直達音の寄与 $L_{A,TD}$ と、それ以外のトンネル内壁における反射に関わる音（トンネル反射音）の寄与 $L_{A,TR}$ のパワー和 $\uparrow$ として式(1)にて求める。図4にトンネル坑口音の伝搬モデルを示す。

直達音の寄与 $L_{A,TD}$ は、文献¹⁹⁾の記述を参考にして基本式(2)を用いて計算する。

$$L_A = 10 \log_{10} \left(10^{L_{A,TD}/10} + 10^{L_{A,TR}/10} \right) \quad (1)$$

$$L_{A,TD} = L_{WA} - 8 - 20 \log_{10} r_D + \Delta L_{dif} + \Delta L_{grnd} \quad (2)$$

ここで、 L_{WA} は直達音の音響パワーレベル[dB]、 r_D は直達音を表す仮想点音源（後述(8)式参照）から受音点までの距離[m]、 ΔL_{dif} は坑口および防音壁による遮蔽に伴う減衰に関する補正量（<0）[dB]、 ΔL_{grnd} は地表面効果による減衰に関する補正量（<0）[dB]である。 L_{WA} は明かり部音のパワーレベルと等しい。 ΔL_{dif} は、図4(a)に示す3/4障壁を仮定³⁾して、トンネル坑口の端部を表す半無限障壁Aと防音壁を表す半無限障壁Bによる遮蔽に関する補正量の和とする⁹⁾。基本式(2)は、直達音の音源パワーレベルは明かり部音と等しく、音源位置は後述(8)式により実音源の位置から仮想点音源の位置に坑口側へ移動させることを示す。

トンネル反射音は、トンネル坑口面上の仮想面音源を8個の点音源に置換し¹⁾、各点音源からの寄与の合成として式(3)～(7)で求める⁴⁾。ここで、トンネル反射音に対する車体による遮蔽効果を導入し、トンネル反射音の予測モデルを図4(b)の通りとする³⁾。図5にトンネル反射音に対する車体による遮蔽効果の算定方法を示す。こ

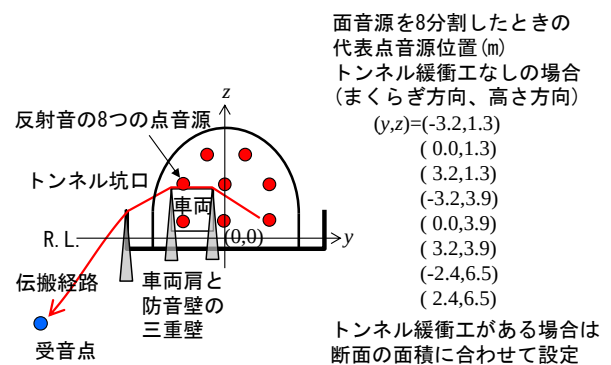


図5 トンネル反射音に対する車体による遮蔽効果の算定方法

では車両と防音壁の3重壁とし、文献⁴⁾の三重遮音壁の回折補正量の計算方法に従って遮蔽補正量を算出する³⁾。

$$L_{A,TR} = 10 \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{L_{A,TR,i}/10} \right) \quad (3)$$

$$L_{A,TR,i} = L'_{WA,R} - 8 - 20 \log_{10} r_i + \Delta L_{dif,i} + \Delta L_{grnd,i} + n * 10 \log_{10} (\cos \theta_i) \quad (4)$$

$$n = n_a (1 - e^{-n_b x}) \quad (5)$$

$$L'_{WA,R} = L_{WA,R} - 10 \log_{10} N \quad (6)$$

$$L_{WA,R} = L_{WA} - 3 + 10 \log_{10} \left\{ \frac{x}{\sqrt{h^2 + x^2}} - \frac{ax}{\sqrt{h^2 + (ax)^2}} \right\} \quad (7)$$

ここで r_i は i 番目の点音源から受音点までの距離[m]、 θ_i は i 番目の点音源から受音点を結ぶ直線と線路長手方向が成す角[rad]、 n は点音源の指向係数である。 n_a および n_b は指向性に関するパラメータで、トンネル内壁面に吸音対策がないとき、 $n_a = 1.6$ 、 $n_b = 0.1$ である⁴⁾。 x はトンネル内の点音源からトンネル坑口端までの距離[m]、 $L'_{WA,R}$ は分割された面音源を点音源とみなした場合の音響パワーレベル[dB]、 $L_{WA,R}$ は面音源の音響パワーレベル[dB]、 N は面音源の分割数で、ここでは図-5に示す通り $N=8$ とする。 h はトンネル断面の面積と等しい半円の半径[m]である。

指向特性を示す項(式(4)右辺第6項)は負の値で、 θ_i が大きいほどその値が小さく、まくらぎ方向への音の放射がより弱いことを表している。また、指向特性を決定するもう一つの変数 x について、式(5)より音源の位置がトンネル坑口から遠くなると、まくらぎ方向への音の放射は小さくなる。ただし、2(2)節の音響模型試験結果から、トンネル坑口から明かり方向に10m以内の領域、すなわち θ が 90° に近い領域でもトンネル反射音の影響が確認された。このことから、この領域における音源の指向特性はトンネル坑口から10mの場合と同等とする。

直達音を表す仮想点音源からトンネル坑口端までの距離 x' [m]およびトンネル内の吸音に関するパラメータ a は、式(8)および式(9)で与える¹⁾。

$$x' = ax \quad (8)$$

$$1 - a = (1 - \alpha)^{0.48} \approx \sqrt{1 - \alpha} \quad (9)$$

α はトンネル内壁の平均吸音率である。トンネル内の吸音に関するパラメータ a は、スラブ軌道の条件では、トンネル内壁がコンクリートである場合は $a=0.04$ とする¹⁾。ただしバラスト軌道の場合、 a はバラストの吸音率と面積を別途考慮する必要がある。トンネル内の吸音特性が区間により異なる場合は、各区間のトンネル内吸音に関するパラメータを a_i 、各区間の長さを l_i として式(10)により計算する。

$$a = \sum_{i=1} (a_i l_i) / \sum_{i=1} l_i \quad (10)$$

(2) 妥当性の評価

前節の手法を用いたトンネル坑口周辺部の騒音の予測結果を図-6に示す。ここで、予測条件は2(1)節の音響模型試験と同じ、音源モデルは文献⁹⁾に則り車両下部音の

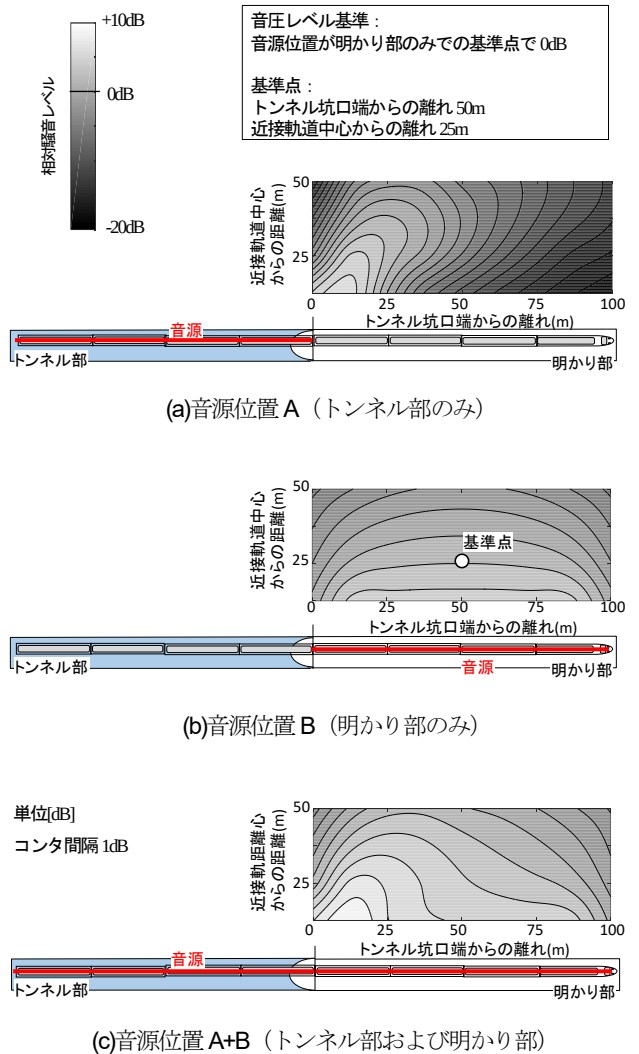


図-6 予測計算によるトンネル坑口周辺部の音圧レベル分布(近接側列車, O.A.値, 単位[dB])

音源を 2.5m 刻みで配置するものとし、図-6 と図-3 の比較から、予測手法の妥当性を評価する。音源長さは、トンネル内 100m、明かり部 100m で合計 200m (8両分) である。図-6(a)はトンネル坑口音 (直達音とトンネル反射音の和)、図-6(b)は明かり部音、図-6(c)の全体音はトンネル坑口音と明かり部音のパワー和である。音響模型試験の結果と比較するため、予測では模型結果の特性 (音源およびマイクロホンの指向特性等) を考慮している。図-6(a)(b)(c)をそれぞれ図-3(a)(b)(c)と比較すると、予測結果は音響模型試験での結果をほぼ再現できており、提案する手法の妥当性を確認した。またトンネル反射音に対する音源の指向特性による影響は、受音点の位置がトンネル坑口に近い場合に大きい傾向にある。

4. 予測手法による対策効果の評価

(1) 音源別寄与度の試算

前章の手法を用いてトンネル坑口周辺部における沿線騒音 (全体音) に占めるトンネル坑口音と明かり部音の寄与度を試算する。音源モデルは 3.(2)節と同様に文献 6) に則り、各音源を 2.5m 刻みで配置する。この音源別寄与度の評価により、トンネル坑口音と明かり部音に対する対策指針を判断することができる。試算条件として、列車長は 250m、軌道はスラブ軌道、構造物はコンクリート高架橋 (RL=GL+7.5m)、防音壁高さは RL+2m である。図-7 に列車位置に対するトンネル坑口音、明かり

部音および全体音 (トンネル坑口音と明かり部音の和) の変化を示す。受音点の位置は、まくらぎ方向に近接軌道中心から 25m 離れ、線路長手方向にトンネル坑口から 20m、60m および 100m である。

図-7 において、受音点の位置がトンネル坑口端から線路長手方向に 20m 離れの場合 (図-7(b))、列車の先頭部の位置がトンネル坑口端から 50m で全体音が最大で、トンネル坑口音の寄与が大きい。一方で受音点の位置がトンネル坑口端から 100m 離れの場合 (図-7(d))、列車の先頭部の位置がトンネル坑口端から 150m で全体音が最大で、明かり部音の寄与が大きい。また受音点の位置がトンネル坑口端から 60m の場合 (図-7(c))、列車の先頭部の位置がトンネル坑口端から 150m で全体音が最大で、音源の両者の寄与はほぼ同等である。受音点の位置がトンネル坑口端から遠いほど、騒音が最大となる列車の位置がトンネル坑口端からより遠方となる。これらは、トンネル坑口端から 60m 以下の受音点ではトンネル坑口音に対する対策が有効であることを示している。

(2) 防音壁のかさ上げと吸音材による騒音低減効果

防音壁のかさ上げ、吸音材貼付およびトンネル内吸音材貼付を対策として、3.(1)節の手法を用いて沿線騒音の最大値に対する低減効果を評価する。防音壁のかさ上げおよび吸音材貼付は、防音壁のある区間の全体に適用する。試算条件は、防音壁の高さ以外は 4.(1)節と同じである。

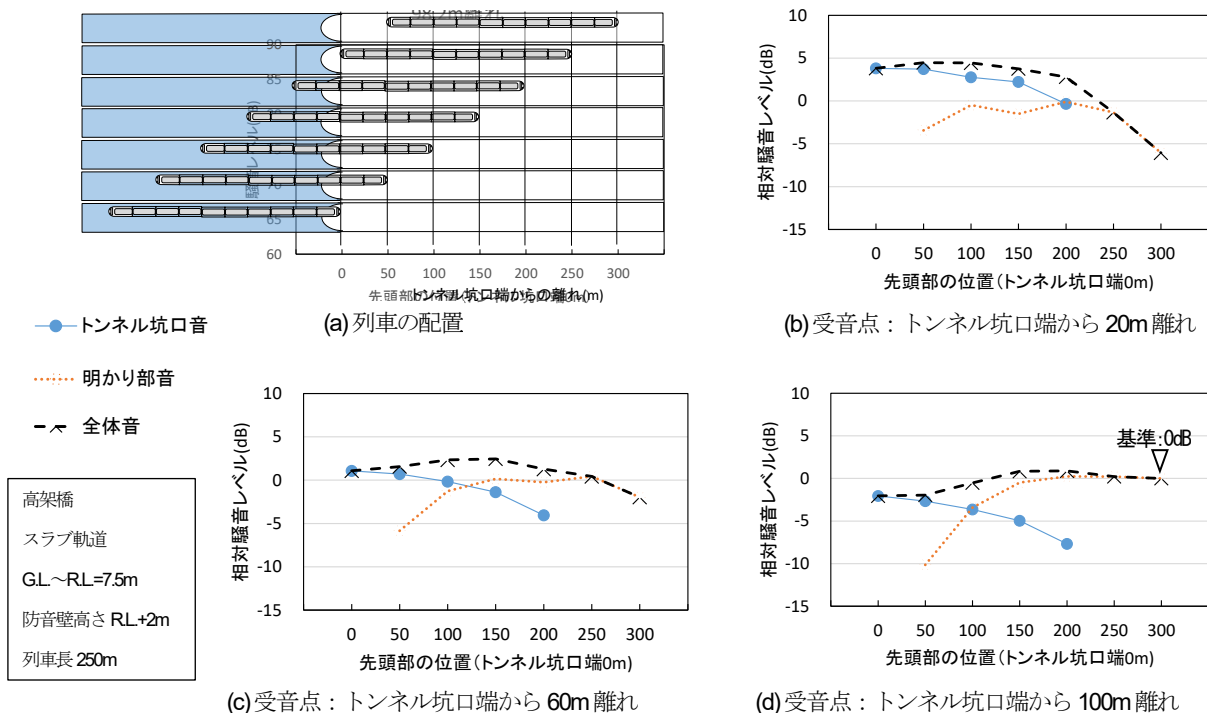


図-7 列車位置による沿線騒音の変化

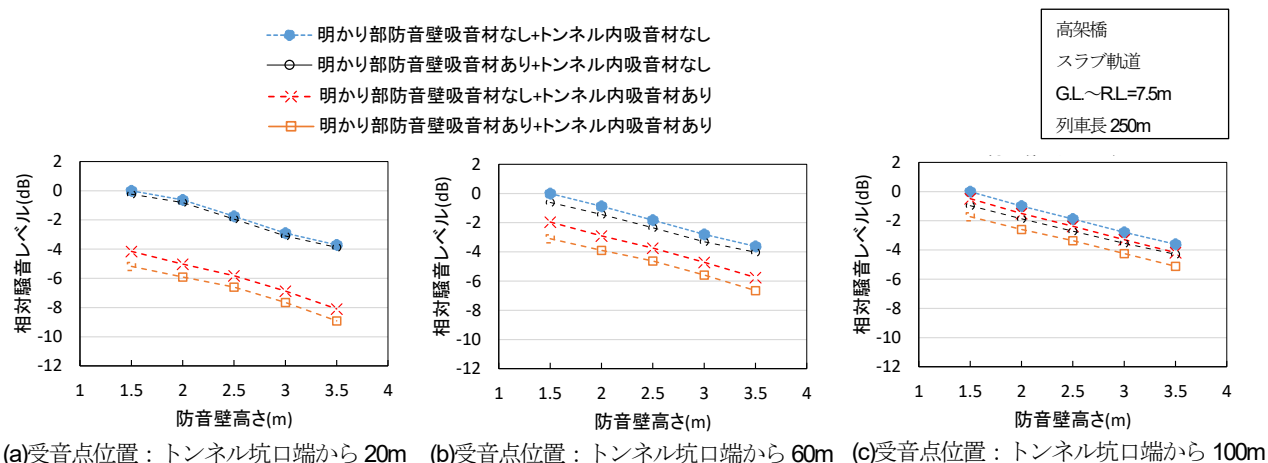


図-8 各種対策時における防音壁高さによる騒音（全体音）の変化

図-8に各種対策時における防音壁高さによる騒音（全体音）の変化を受音点の位置ごとに示す。受音点の位置は、まくらぎ方向に近接軌道中心から25m離れ、線路長手方向にトンネル坑口から20m、60mおよび100mである。トンネル内吸音材なしの条件では前章の吸音パラメータ $\alpha=0.04$ （トンネル内壁がコンクリートである場合）とし、吸音材ありの条件では吸音パラメータ $\alpha=0.6$ （トンネル内壁の全長全周吸音対策の場合、式(9)において $\alpha=0.84$ ）とする。なお、この吸音パラメータは、材料の吸音率、トンネルの単位長さ当たりの貼付面積、トンネル長手方向の貼付長さ等に依存する。図中、各受音点位置においてトンネル内吸音材なしで防音壁高さが1.5mの場合の騒音レベルを基準（0dB）とする。

吸音材なしの場合の防音壁のかさ上げ効果は、受音点の位置に寄らずほぼ同じである。これは、この対策が明かり部音およびトンネル坑口音に対する音の遮蔽としての騒音低減効果を持つためである。トンネル内の吸音材の効果（トンネル内吸音材なしとありの場合の差）は、防音壁の高さに依らず、トンネル坑口端から20mの受音点で4dB程度である。しかし受音点の位置がトンネル坑口から遠くなるとその効果は小さくなり、トンネル坑口端から100mの受音点では1dB程度となる。これは、トンネル坑口から遠方に位置する評価点では明かり部音の寄与が大きいためである。一方で明かり部の防音壁吸音材は、トンネル坑口端から100mの受音点では約1~2dBの騒音低減効果を持つが、トンネル坑口端から20mの受音点ではその効果は小さい。これは、明かり部の防音壁吸音材の騒音低減効果が明かり部音のみに限定され、トンネル坑口に近い受音点では相対的に明かり部音の寄与が小さいためである。

図-7および図-8のように、3(1)節の予測手法を用いることにより、受音点における音源別寄与度と騒音低減量

を試算でき、必要とされる対策方法とその効果を検討することができる。なお、トンネル内吸音材の貼付延長について、列車長以上に貼付することによる騒音低減効果は少ないと言えるが、トンネル内吸音材の貼付延長と騒音低減効果の定量的な評価は今後の課題である。

5. まとめ

トンネル坑口周辺部における騒音をより精度よく予測する手法を構築することを目的に、現車試験および音響模型試験を実施し、そこで得られた沿線騒音の分布を示した。それらの試験結果に基づき、トンネル坑口周辺部における沿線騒音の予測手法として、トンネル坑口音を構成するトンネル反射音に関して、車体による音の遮蔽の影響と音源の指向特性を考慮したトンネル坑口音の予測モデルを提案した。このモデルによる騒音の予測値と音響模型試験の実測値が概ね一致することから、予測モデルの妥当性を確認した。次いで、防音壁のかさ上げと吸音材貼付、トンネル内壁の吸音材貼付を対象として、騒音予測手法を用いて沿線騒音に対する騒音低減効果を評価し、受音点の位置により有効な対策が異なることを示した。

参考文献

- 1) 長倉清：トンネル坑口騒音の予測と対策，鉄道総研報告，Vol.17，No.11，pp.13-18，2003
- 2) 川口二俊，長倉清，松井精一：トンネル緩衝工内の吸音化による坑口騒音の低減効果，鉄道総研報告，Vol.28，No.3，pp.11-16，2014
- 3) 小方幸恵，村田香，北川敏樹：新幹線のトンネル周辺における騒音予測手法の検討，第28回環境工学総合シンポジウム2018講演論文集，pp.40-43，2018
- 4) 日本響学会道路交通騒音調査委員会：道路交通騒音の予測モデル“ASJ RTN-Model 2018”，日本響学会

- 会誌, Vol.75, No.4, pp.188-250, 2019
- 5) 小方幸恵, 北川敏樹: トンネル坑口周辺部の沿線騒音に対する対策効果の評価, 第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019) 講演論文集, 2019
 - 6) 長倉清, 善田康雄: 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.5-10, 2000
 - 7) JIS Z 8738: 屋外の音の伝搬における空気吸収の計算
 - 8) 山本貢平, 堀田竜太, 高木興一: 有限長障壁に対す

る音の回折効果の計算方法について, 日本音響学会誌, Vol.50, No. 4, pp. 271-278, 1994

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

STUDY ON RAILWAY NOISE PREDICTION MODEL AROUND TUNNEL PORTALS

Yukie OGATA and Toshiki KITAGAWA

In order to build a model that accurately predicts Shinkansen wayside noise around tunnel portals, a field test and an acoustic model test were carried out to understand the noises characteristics around tunnel portal. On the basis of these results, a prediction model is proposed. Both the screening effect due to vehicles and the directional characteristics of noises are introduced in the model. Since the prediction results and the results of the acoustic model test are in agreement, the validity of the prediction method is confirmed. Then, the noise reduction effect on the wayside noise is evaluated using the method, and it is shown that effective measures depend on the position of the sound receiving point.