

トンネル緩衝工内の吸音化による坑口騒音の低減効果

川口 二俊* 長倉 清** 松井 精一***

Reducing Effect of Absorbing Materials Covering the Inner Walls of
the Tunnel Entrance Hood on Noise from a Tunnel Portal of Shinkansen

Tsugutoshi KAWAGUCHI Kiyoshi NAGAKURA Seiichi MATSUI

Railway noise measured at points near a tunnel portal of Shinkansen consists of the noise from the tunnel portal generated while a train is running in the tunnel and the noise from the open section where the train is running. This leads to the increase of noise level compared with the usual case where the total length of the train is in an open section. The aim of this paper is to examine the reducing effect of absorbing materials covering the inner walls of the tunnel entrance hood on the noise from the tunnel portal by model acoustic experiments. Because the reducing effect observed by the model experiments is approximately consistent with that observed by a field test on a Shinkansen line, it has been confirmed that the model experiment is valid in predicting Shinkansen noise.

キーワード：トンネル坑口騒音，トンネル入口緩衝工，吸音対策，音響模型実験，現車走行試験

1. はじめに

新幹線がトンネル坑口付近を通過する際の騒音は、通常の明かり区間の走行音とトンネル内走行時に発生する音がトンネル内を反響して坑口から放射される音（坑口放射音）で構成される。坑口周辺の騒音に対する坑口放射音の寄与が明かり区間からの音に比べて大きい場合、騒音低減のためには坑口放射音への対策が必要である。鉄道総研では、対策案として坑口付近の防音壁嵩上げおよびトンネル内吸音化を提示している¹⁾。ただし、前者は軌道構造物の強度の関係で施工高さには限度があることから実現には困難が伴うと想定される。一方、後者は対策効果の予測手法の提案に留まっている。そこで、本研究では、新幹線が高速走行する際のトンネル微気圧波対策としてトンネル入口に設置されている緩衝工に着目し、その内壁を吸音化した場合の騒音低減効果を1/20縮尺模型を用いた音響実験により定量的に予測する。さらに、新幹線の既設緩衝工に対して吸音板を施工した場合の現地試験結果に対する予測結果の整合性を評価する。

2. 既設緩衝工の概要²⁾

図1に、本研究で検討対象とした既設緩衝工の外観を示す。緩衝工は延長10m超の鋼製、軌道構造はスラ

ブ軌道である。明かり区間はコンクリート高架橋で、騒音測定を実施した近接軌道側にレールレベル(R.L.)+3m、遠隔軌道側にR.L.+2mの防音壁が設置されている。

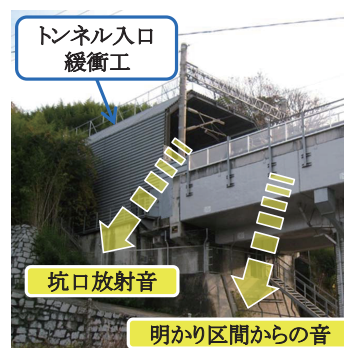


図1 検討対象のトンネル入口緩衝工の外観

3. 坑口騒音の寄与度評価方法

坑口騒音を効率良く低減するためには、坑口放射音と明かり区間からの音のそれぞれの寄与度を把握することが必要である。そこで、坑口騒音の測定結果から坑口放射音の寄与を評価する方法を以下に述べる。

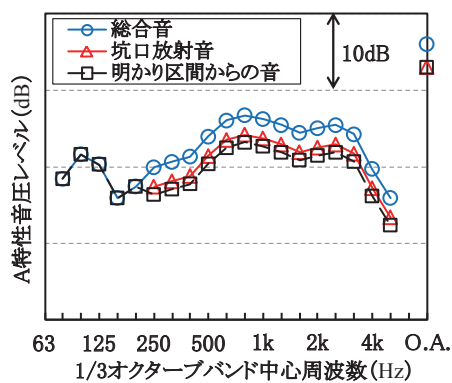
- 列車通過時の坑口周辺の総合音および坑口周辺の軌道・構造物条件、列車条件、軌道とマイクロホンの位置関係が同じ場所における明かり区間からの音の最大騒音レベル(O.A.値)をそれぞれ取得する。
- 総合音と明かり区間からの音のパワー差を取り、坑口放射音の最大騒音レベル(O.A.値)を通過軌道別に求める。
- 明かり区間からの音と坑口放射音の周波数スペクトルを定める。これに際し、以下を仮定する。

* 環境工学研究部 騒音解析研究室
** 環境工学研究部
*** 西日本旅客鉄道株式会社

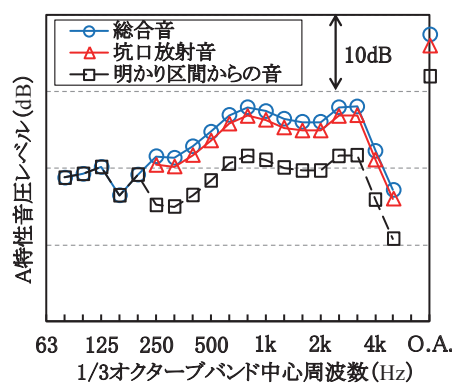
特集：沿線環境

- ・ 明かり区間からの音と坑口放射音の周波数スペクトルの形状は、総合音と同じとする。
- ・ 総合音の 200Hz バンド以下の周波数成分は、コンクリート高架橋の構造物音と考え、全て明かり区間からの音の寄与とする。コンクリート橋の構造物音は、一定間隔で配列されたレール締結部を車軸が通過する場合のレールから構造物へ伝達する周期的加振力などの影響を受け、それは 200Hz 以下の低周波数範囲に集中している⁴⁾。

明かり区間からの音と坑口放射音のそれぞれについて、総合音との O.A. 値の差に一致するように 250Hz バンド以上の周波数成分を一律に下げる。図 2 に、坑口騒音の寄与度分析結果を示す。坑口放射音は明かり区間からの音よりも大きく、総合音の O.A. 値および総合音に対する坑口放射音の寄与率は、近接軌道通過時よりも遠隔軌道通過時の方が大きいことがわかる。



(a) 近接軌道通過時



(b) 遠隔軌道通過時

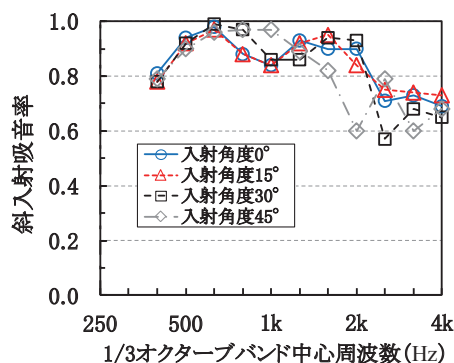
図 2 坑口騒音の寄与度分析結果

4. 音響模型実験³⁾

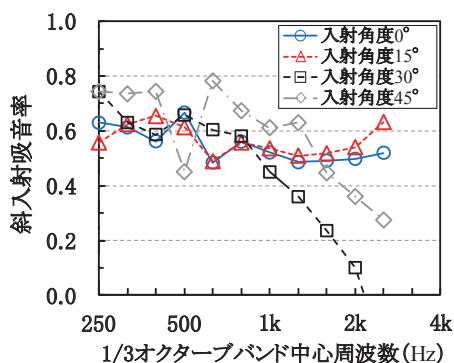
4.1 模型実験用吸音材の選定

模型実験で使用する吸音材は、既設緩衝工に設置する吸音板と同程度の吸音率を持つ必要がある。様々な材料の吸音特性を調査した結果、実験用吸音材として、ポリウレタン系の材料であるモルトブレン (5mm 厚) の表面に帆布 (約 0.5mm 厚) を貼り付けたものを選定した。

図 3 に、実物吸音板および模型実験用吸音材の斜入射吸音率を示す。なお、同図 (b) の周波数は実物対応に換算した値である。実験用吸音材の吸音率は、実物吸音板に比べて吸音材への音の入射角度によるばらつきが大きく、0.3 程度低いが、実物吸音板の特性に概ね近似できていると考えられる。したがって、この模型実験用吸音材を用いた騒音予測は安全側の評価となる。



(a) 実物吸音板



(b) 模型実験用吸音材

図 3 実物吸音板および模型実験用吸音材の斜入射吸音率の比較

4.2 模型諸元および実験条件

模型実験で使用する模型は、構造物模型と車両模型に大別され、縮尺はそれぞれ 1/20 である。模型諸元および実験条件は、以下の通りである。

(1) 構造物模型

構造物模型は、対象区間の構造物を模擬した明かり区間 (高架橋) 40m、トンネルと緩衝工を含む区間 40m の全長 80m で構成される。スラブ軌道面は、音の反射率の高さを考慮し金属板で表現した。明かり区間の音圧測定点に対して近接軌道側には R.L.+3m 高さ、遠隔軌道側には R.L.+2m の防音壁、トンネル・緩衝工区間には、検討対象の 10m 級緩衝工を模擬した模型が設置される。また、吸音材の軌道方向の貼付延長と騒音低減効果の関係を評価するため、10m 級緩衝工を 10m、20m 延長した緩衝工 (20m 級、30m 級緩衝工) に対する試番を設ける。なお、当該試番の明かり区間の防音壁高さは、R.L.+2m である。

(2) 車両模型 (図4参照)

車両模型は、全長40mの新幹線車両を模擬したもので、車両直角断面が全長に渡って一様な構造である。車両は、車端部が緩衝工口(明かり区間とトンネル・緩衝工区間の境界面)に一致するようにトンネル・緩衝工区間または明かり区間の近接軌道または遠隔軌道上に設置される。

(3) 音源

列車走行に伴って発生する騒音の音源パワーレベルは、車両下部音が最も大きい傾向にある⁵⁾。そこで、車両長さに相当する有限長線音源を車両床下の軌道中心に配置する。坑口放射音を評価する場合は、音源をトンネル・緩衝工区間に、明かり区間からの音の評価する場合は、明かり区間に設置する。

(4) 吸音材貼付位置 (図4参照)

吸音材の軌道方向の貼付延長について、緩衝工口からトンネルに向かって、10m級緩衝工は8.3m、20m級は18.3m、30m級は5m～28.3m、周方向の貼付位置は、①斜面と上面、②側面、③全周(①+②)の3条件である。

(5) 音圧評価点 (図4参照)

音圧評価点は、近接軌道中心からの離れ12.5m、25m、50m、緩衝工口からの軌道方向離れ0m、10m、20m、30m、高さR.L.-8m、-5m、0m、+5mの計24点である。また、データ比較の上での基準となる標準測定点(近接軌道中心から25m離れ、緩衝工口から軌道方向20m離れ、高さR.L.-5m)を設ける。

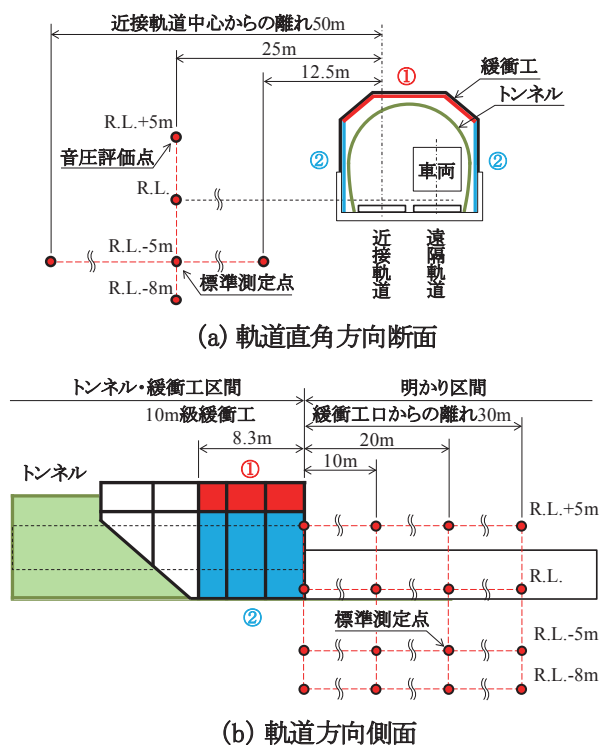


図4 模型実験における吸音材貼付位置および音圧評価点

4.3 測定機器

模型実験に使用した各測定機器の設定を以下に示す。

騒音計：1/4 インチマイクロホン(～100kHz)、周波数重み付け特性F、FFTアナライザ：サンプリング周波数256kHz、データ長2048

4.4 データ整理

模型条件ごとの各測定点における音圧と吸音材未貼付時の標準測定点における音圧の差を実物対応の周波数バンドごとに求め、現地の標準測定点における明かり区間からの音または坑口放射音の周波数スペクトル(図2参照)に加えることにより、各測定点における明かり区間からの音または対策後の坑口放射音の周波数スペクトルを求める。

5. 模型実験結果³⁾

5.1 坑口放射音の平面分布

吸音材を貼付することによる騒音分布の変化を評価する。図5に、10m級緩衝工に対して吸音材未貼付または緩衝工口から8.3m全周に吸音材を貼付した場合の坑口放射音の平面分布を示す。なお、等高線上の数値は、吸音材未貼付で音源が近接軌道上にある場合の標準測定点における結果とのレベル差を表している。同図(a)、(b)より、吸音材未貼付の条件では、音源が遠隔軌道上にある場合の方が坑口放射音の騒音レベルが大きくなることわかる。これは、音源が近接軌道上にある場合に比べ、

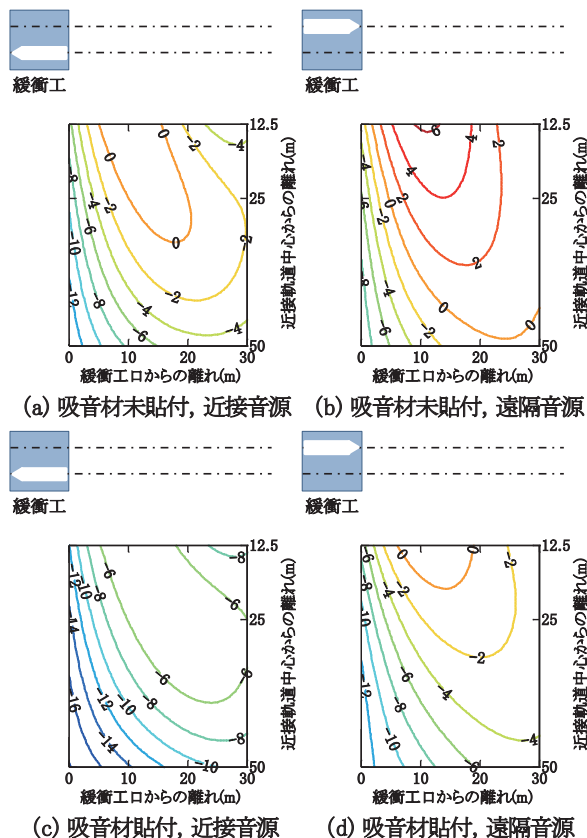


図5 模型実験による坑口放射音の騒音レベル分布(10m級緩衝工、R.L.-5m、吸音条件:緩衝工口より8.3m全周)

特集：沿線環境

緩衝工上部（上面または斜面）で反射して測定点まで伝播する音が大きいと考えられる。また、緩衝工口から明かり区間に向かって斜め前方に音の指向性が強く、近接軌道中心から25m 離れでは、緩衝工口から軌道方向に10m～20m の位置で騒音レベルが大きくなる傾向にある。吸音材を貼付した場合は、音源位置および測定点位置に関わらず坑口放射音の騒音レベルは低減し、約4dB の低下が見られる。

5.2 吸音材貼付延長と坑口放射音低減効果の関係

図6に、10m～30m 級緩衝工のほぼ全長の範囲に吸音材を全周に貼付した場合の標準測定点における坑口放射音の低減量を示す。同図より、騒音低減量は緩衝工が長くなるほど増加し、30m 級緩衝工では8dB～9dB 程度であることがわかる。これは、トンネル内部で発生した音について、緩衝工内での音の反射を繰り返す頻度が緩衝工が長くなるほど多く、明かり区間に放射されるエネルギーがより減衰するためである。音源位置別に見ると、音源が遠隔軌道上にある場合の方が騒音低減量は大きい傾向にある。これは、音源が近接軌道上にある場合に比べ、車両と遠隔側の緩衝工内面との音の多重反射により低減する音の寄与が大きいためと考えられる。また、図7に、30m 級緩衝工の緩衝工口からの吸音材貼付延長に対する坑口放射音の低減量を示す。貼付延長が15m 以上となると、それ未満の場合よりも単位貼付長当たりの低減量が低下する傾向にあることがわかる。

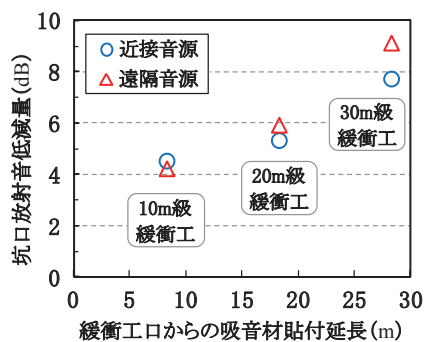


図6 模型実験による緩衝工長と標準測定点における坑口放射音低減効果の関係（吸音条件：全周）

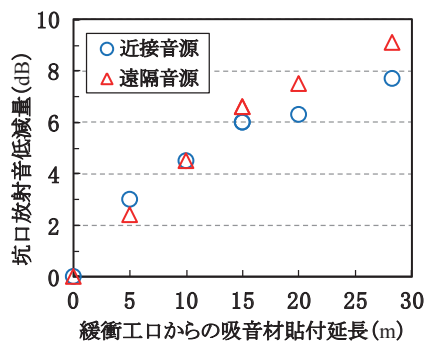


図7 模型実験による吸音材貼付延長と標準測定点における坑口放射音低減量の関係（30m 級緩衝工、吸音条件：全周）

5.3 測定点高さと吸音材貼付位置が坑口放射音低減効果に与える影響

図8に、近接軌道中心から25m 離れ、緩衝工口から軌道方向20m 離れにある各測定点からの緩衝工の外観を示す。測定点の高さによって緩衝工内部の見え方が異なる。ここでは、吸音材を貼り付ける位置による各測定点での低減効果の違いについて検討する。図9に、測定点高さと吸音材貼付位置をパラメータとした場合の坑口

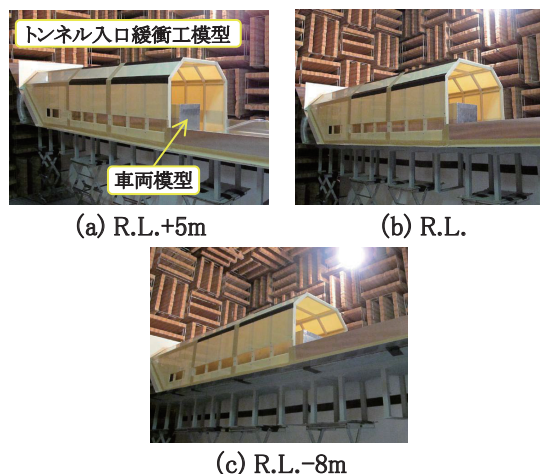


図8 測定点高さによる緩衝工内部の見通しの違い（近接軌道中心から25m 離れ、緩衝工口から20m 離れ）
注）本報告の模型条件では、緩衝工側面のスリットは塞がれている。

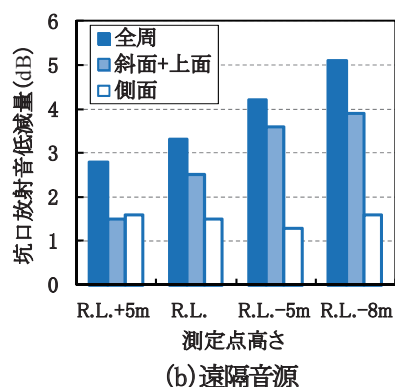
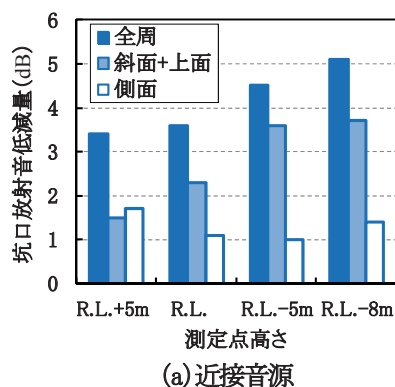


図9 測定点高さと坑口放射音低減量の関係（10m 級緩衝工、吸音条件：緩衝工口より8.3m、音圧評価点：近接軌道中心から25m 離れ、緩衝工口から20m 離れ）

放射音の低減量を示す。同図より、測定点位置が低いほど騒音低減効果が大きい傾向にあることがわかる。これは、防音壁の回折効果で音源からの直達音の寄与が小さくなる一方、測定点で観測される音に対する坑口放射音の寄与率が大きくなるためと推測される。貼り付け位置については、側面、斜面と上面、全周の順に坑口放射音の低減効果が大きくなる。ただし、R.L. よりも高い測定点では、側面、斜面と上面の低減効果はほぼ同等となる。以上より、R.L. よりも低く坑口を見上げるような位置関係にある測定点については、その測定点からの見通しが良い緩衝工の斜面及び上面を吸音処理することが坑口放射音を低減するために有効である。

6. 現車走行試験²⁾

6.1 吸音板設置工事の概要

緩衝工内吸音化処理による坑口放射音の低減効果の予測結果を基に、10m級の既設緩衝工に対し吸音板の設置工事を施工した。図10に、吸音板設置工事の状況を示す。吸音板は、落下防止の観点から軽量であり繊維系の吸音材を使用しないことを条件に(株)神戸製鋼所製アルミ製微細多孔吸音板を採用し、緩衝工口より10m全周に設置した。なお、同吸音板は図3に示したものと異なるが、類似の吸音特性をもつ。吸音板の施工順序について、模型実験では緩衝工口より順にトンネルに向かって吸音材貼付面を延長させたが、実施工では緩衝工の構造の関係でトンネル側から緩衝工口に向かって吸音板を設置した。

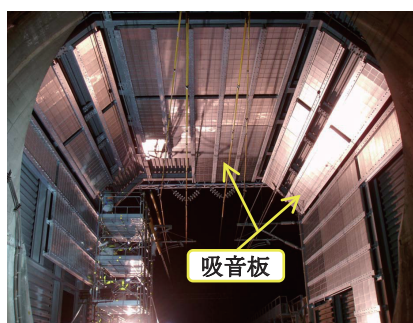


図10 吸音板設置工事の状況（トンネル内部より撮影）

6.2 騒音測定条件

吸音板の設置延長と騒音低減効果の関係を確認するため、騒音測定は施工前、施工途中3回（緩衝工口よりトンネル側10mの断面から緩衝工口へ向かって2.5m, 5m, 7.5mに設置した3段階）、施工後の計5回実施した。騒音測定点は、標準測定点に概ね対応する測定点a（緩衝工口からの軌道方向20m離れ、近接軌道中心から21.5m離れ、R.L.-6m）および測定点aより軌道方向に緩衝工口へ10mの位置にある測定点bの2点である。騒音の評価方法については、環境省より告示されている「新幹線鉄道騒音測定・評価マニュアル」⁶⁾に則り、測

定対象とする列車本数は、近接軌道・遠隔軌道通過列車を含めた計20本である。列車通過時の最大騒音レベル（時間重み付け特性S）の上位10本のパワー平均値を求める。また、当該マニュアルによる方法とは別に、列車20本のうち近接軌道、遠隔軌道通過時の最大騒音レベルのパワー平均値をそれぞれ求める。なお、ここでの騒音レベルは、坑口周辺での総合音を指す。

7. 模型実験結果と現車試験結果の整合性評価²⁾³⁾

7.1 総合音低減効果

図11に、吸音板を緩衝工口より10m全周に施工した場合の各測定点における総合音低減量の実測結果を示す。また、同図に模型実験による測定点a, bに対応する位置での予測結果を併記する。なお、総合音の予測値は、坑口放射音に明かり区間からの音の寄与をパワー和することにより求める。実測による測定点a（標準測定点）においては、音源位置によらず約4dBの低減効果が得られていることがわかる。また同様に緩衝工内部を見通せる測定点bについても同等な結果である。ここで、予測結果を見ると、遠隔軌道上に音源がある場合の低減量は3dB～4dBで実測結果に概ね近いことがわかる。一方、近接軌道上に音源がある場合は、低減量が2dB程度とやや過小評価であり、音源位置による低減量が異なる点で実測結果と傾向が異なる。この原因については、7.3節にて考察する。上位10本のパワー平均値での低減効果は3dB～4dBで、遠隔軌道上に音源がある場合の予測結果に概ね対応する。これは、3章で述べたように実測による施工前の坑口放射音は、近接軌道通過時よりも遠隔軌道通過時の方が大きいことから、遠隔軌道に音源がある場合の騒音低減量の寄与で低減効果が決まっているためである。以上より、模型実験により坑口騒音の低減効果を概ね予測できたといえる。

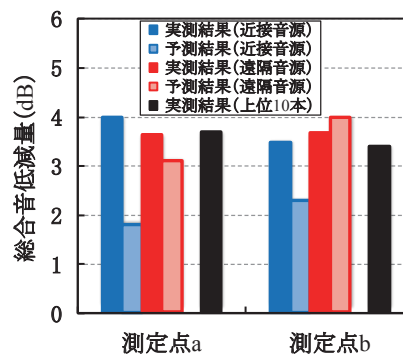


図11 総合音低減量の実測値と予測値の比較
（吸音条件：緩衝工口より10m全周）

7.2 吸音板設置延長と総合音低減量の関係

図12に、吸音板設置延長と総合音低減量の関係を示す。また、予測結果についても実測による吸音板設置条

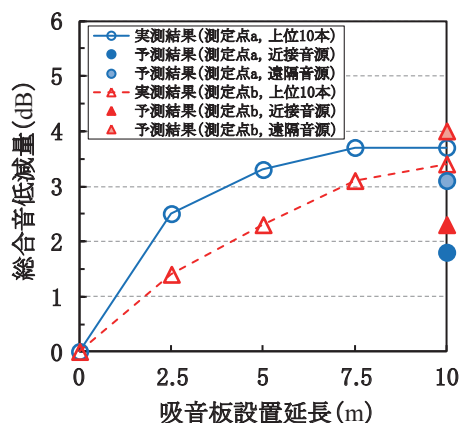


図 12 既設緩衝工の吸音板設置延長と総合音低減量の関係

件に対応する吸音材貼付延長10mの低減量を併記する。同図より、実測結果では、測定点位置によらず設置延長が大きくなるほど、吸音板の単位長さ当たりの騒音低減効果が小さくなることがわかる。しかし、模型実験では、測定点から緩衝工内部を見渡せる緩衝工口周辺に重点的に吸音材を貼付した場合に、大きな騒音低減効果が得られたため、施工の最終段階で吸音板の単位長さ当たりの効果が最大になると予想していた。両者の試験条件が異なり比較できないため、結果のかい離については今後の検証が必要である。

7.3 総合音の周波数特性

図 13 に、総合音低減量の周波数特性を示す。実測結果で 200Hz バンド以下の周波数域で低減効果が小さいことがわかる。これは、当該の周波数域では吸音板の吸音率が低いこと、対策効果が現れない高架橋から放射される構造物音の寄与が大きいこと、また緩衝工基礎部の構造物音の影響も含まれる可能性があるためと考えられる。250Hz バンド以上では、対策によって 2dB ~ 6dB 程度低減していることがわかる。予測結果の 250Hz バンド以上では、音源位置によらず広帯域で一定の低減量となる特徴的なスペクトルを示す。実測結果と予測結果を比較すると、遠隔軌道に音源がある場合は、250Hz ~ 2kHz バンドの周波数域でスペクトルがほぼ一致している。一方、2.5kHz 以上での予測結果は、2dB 以上の過小評価である。この原因として、模型実験用吸音材の吸音率は、高周波数域ほど低下する傾向にあり、実物吸音板の吸音率との差が大きくなったために、車両と遠隔側の緩衝工内面との音の多重反射による騒音低減量に大きなかい離が生じたことが考えられる。近接軌道に音源がある場合は、遠隔軌道の場合よりも低い周波数 (800Hz バンド) 以上で、予測が実測を 2dB ~ 4dB 程度下回る傾向にある。吸音材の吸音率が比較的高い周波数域であることから、トンネル・緩衝工内での反射音の伝搬状況の違いとは考えにくい。この一因には、現地での

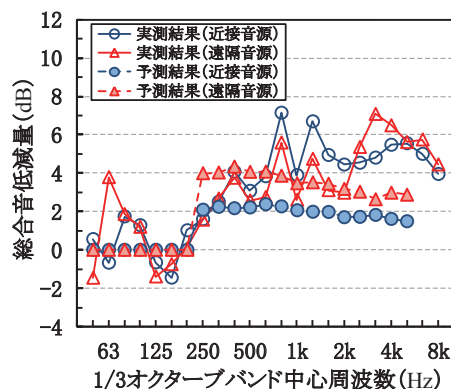


図 13 標準測定点における総合音低減量の周波数特性の実測値と予測値の比較 (吸音条件：緩衝工口より 10m 全周)

坑口騒音の寄与度評価の際に用いた明かり区間からの音について、その音源長は坑口周辺の場合よりも長いために、寄与をやや過大に見積もられたことが考えられる。

8. まとめ

新幹線のトンネル坑口付近の騒音は、明かり区間からの音と坑口放射音との重ね合わせによるものであり、本報告では緩衝工内壁を吸音化することによる坑口放射音の低減効果を音響模型実験により確認した。その結果、10m 級の緩衝工に対して全周囲を吸音化した場合、坑口放射音の騒音レベルが約 4dB 低減することがわかった。また、この吸音条件に対応する対策を新幹線の既設緩衝工に施したところ、模型実験による予測結果とほぼ同等の騒音低減効果が得られた。以上より、音響模型実験による坑口騒音の予測結果には妥当性があることが確認された。今後、新幹線沿線に存在するトンネル坑口に対して、本報告で示した対策により坑口騒音がさらに低減されることが期待される。

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) 松井精一、川崎照夫ほか：「緩衝工内吸音処理による新幹線鉄道トンネル坑口騒音低減効果の検証」、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.281-284, 2012.9
- 3) 松井精一、川崎照夫ほか：「緩衝工内吸音処理による新幹線鉄道トンネル坑口騒音低減効果の予測」、日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.135-138, 2010.9
- 4) 半坂征則、佐藤大悟ほか：「コンクリート高架橋における構造物音の予測手法」、鉄道総研報告、Vol.24, No.9, pp.11-16, 2010
- 5) 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
- 6) 新幹線鉄道騒音測定・評価マニュアル (環境省)