

道路騒音低減装置（ノイズリデューサー）の騒音低減効果に関する境界要素法による解析

庄野 豊¹・吉村義朗²・山本貢平³

¹正会員 日本道路公団本社施設部（〒100 千代田区霞が関3-3-2, 新霞が関ビルディング）

²日本道路公団東京第2管理局保全企画課（〒339 岩槻市加倉260）

³工博（株）小林理学研究所（〒185 国分寺市東元町3-20-41）

道路遮音壁先端に設置して騒音低減効果を高める音響装置（ノイズリデューサー）について、その設置効果の解析を波動音響に基づく理論計算によって行った。理論計算は二次元境界要素法を用いて行い、その設置効果の特徴を明らかにするとともに、現地実測による測定値ともよい一致が得られることを示した。

Key Words: noise barrier, boundary element method, road traffic noise, absorptive device

1. はじめに

高速道路における交通騒音対策として従来より高速道路沿いに遮音壁の設置が行われてきた。しかし、最近の交通量の増大に伴う騒音値の上昇に対してよりレベルの高い騒音対策の必要が生じ、既設遮音壁の高上げ、橋梁中央分離帯開口部の閉塞、あるいは環境施設帯の設置などの諸対策が講じられてきている。そのうち、最も直接的で数量の多い既設遮音壁の高上げには、種々の制約がある。例えば、日照・眺望阻害や電波障害への考慮などがある他、特に高架橋梁部ではその構造上、補強をしないと遮音壁の高上げが困難な状態にある場合もある。

このような状況の中で、騒音低減に対して遮音壁の高上げと同等の効果をもつ装置が各所において設置されつつある。これは、遮音壁先端に高さ50cmの騒音低減装置（以下、これを「ノイズリデューサー」という。）を設置するものである。ノイズリデューサーの騒音低減効果については、種々の模型実験及び現地試験等によりその効果が確認されている¹⁾。現地試験は、高速道路の既設遮音壁上に実際にノイズリデューサーを設置し、その効果を測定したものであり、高さ50cmのノイズリデューサーを設置することで遮音壁を2m高上げする場合と同程度である2~3dBの騒音低減が図られることが示されている。

このように、ノイズリデューサーを設置すれば相応の騒音低減効果を図ることができるが、高速道路現場で本格的に効率的な活用を行っていくためには、得られる低減効果を予測できることが望ましい。そこで、筆者らは数値解析手法を用い遮音壁背面の音場を計算し、それを

低減効果の予測に反映させることを検討した。

具体的には、高架道路上の直壁先端に円筒に近い形をもつノイズリデューサーが付いた複雑な境界条件に対してノイズリデューサーの吸音性能を検討するための境界要素法を用いた数値解析を実施した。数値解析結果は現地試験結果等と定性的のみならず定量的にもよく一致しており、ノイズリデューサーの騒音低減効果の理論的裏付けができたと共に、騒音低減効果の予測も可能なことを示すことができた。

本論文は、この理論的解析結果を報告するものである。

2. ノイズリデューサーの構造

ノイズリデューサーについては、開発初期段階において種々の形状のものについて縮尺模型実験を行い、形状の違いによる減音効果を調べている¹⁾。円筒形、三角形、逆三角形、矩形等で試験を実施し、全ての場合において従来形遮音壁である直壁を上回る減音効果が認められたが、なかでも、円筒形は他の形状に比べるとやや優れた結果が得られた。また、円筒形の外径に注目した結果、フレネル数（回折行路差を半波長で除した値） N が $N \geq 10$ のような大きな値をとる範囲に対しては外径が大きいほど減音効果に優れる傾向が見られた。一方、景観に配慮して円筒形をベースに形状をきのこのように変形させたもの（以下、「マッシュルーム型」という。）についても円筒形のものと同程度の減音効果が得られた。

これらのことから、経済性、高速道路における既設遮音壁のパネルサイズ、建築限界の余裕、そして景観性を

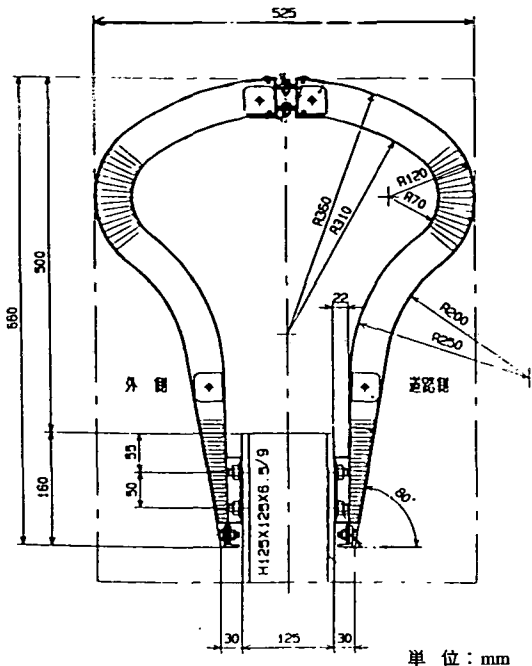


図-1 ノイズリデューサー構造図

考慮し、ここでは図-1に示すように高さ50cmのマッシュルーム型を基本として解析した。このノイズリデューサーの実際の設置に際しての材質は表面板としてポリカーボネート板、吸音材として厚さ50mmのグラスウール、内面板は亜鉛鉄板を使用したもので、景観を重視し、なめらかなマッシュルーム形状となっている。

3. ノイズリデューサーの設置効果に関する理論的解析

(1) 理論的背景

ノイズリデューサーは遮音壁の上部に設置し、遮音壁の大きな嵩上げを伴わずに周辺環境への騒音を低減させるものである。これは、障壁の上部先端に吸音性の物体を設置すれば背後の音場での音圧レベルをより一層低減できるという原理を応用したものである^{2),3)}。ノイズリデューサーは、模型実験、実物実験などの実証的手段によって開発されたものであり、その効果は高速道路での現地試験等によって確認されているが、ノイズリデューサーの背後の音場の状態について理論的には明確でない。遮音壁の背後の音場についての理論的な検討はたとえば鏡らの研究⁴⁾がある。鏡らは遮音壁を傾けることにより遮音壁間の多重反射による騒音の悪影響が緩和されることを境界要素シミュレーションによって示している。しかし、対象としている周波数が150Hz~350Hzという低音源に限られており、道路交通騒音の主要成分で

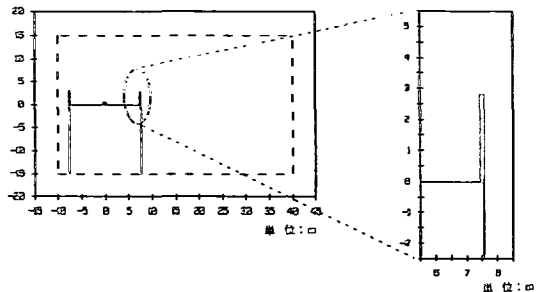


図-2 計算範囲(道路面中央部原点)

ある1,000Hz付近のものについては触れていない。また、西田⁵⁾は有限長障壁による音波の回折について計算と実験の両面から境界要素法の応用の有意性を論じており、境界要素法は三次元音場では計算量が膨大となるが、二次元での計算結果で三次元状態を近似できることも示している。

そこで、筆者らは境界要素法を用いてノイズリデューサーが上端に設置された遮音壁の背面の状態を解析し、ノイズリデューサーによる騒音低減効果を理論的に解明すべく研究を進めることとした。

(2) 境界要素法による数値解析

道路交通騒音は無限に続く点音源列からの騒音とみなせるので、騒音発生源は近似的に線音源とみなすことができる。したがって線音源からの回折、伝搬問題を解析する場合は二次元問題として取り扱うことができる。そこで遮音壁や道路などの断面形状が奥行き方向に変化しない二次元空間を対象にHelmholtzの境界積分方程式(1)をもとに境界要素法により数値解析を実施した。

$$p(r) = \int_S \left[p(r') \frac{\partial p_f(r, r')}{\partial n_{r'}} - p_f(r, r') \cdot \frac{\partial p(r')}{\partial n_{r'}} \right] ds(r') + p_f(r_0, r) \quad (1)$$

$p(r)$: 境界面 S が存在するときの任意の点 r での音圧

$p(r')$: 境界面 S が存在するときの境界面上の点 r' での音圧

$p_f(r_1, r_2)$: 自由音場で音源が r_1 にあるときの r_2 での音圧

$\partial/\partial n_{r'}$: 境界面上の点 r' での外向き法線方向微分

(3) 計算条件

ノイズリデューサーは既設遮音壁の嵩上げが橋梁本体の補強なしでは難しい高架橋梁部での設置に最も期待がもたれる。そのため、本解析においても高架橋梁部を対象に図-2のとおり計算範囲を設定した。高架道路中央に音源を配置し、道路両端には遮音壁を想定した障壁を設けている。左側遮音壁は高さ3mの直壁で固定とし、右

側遮音壁の構造を変え、遮音壁背後の音場の計算を実施している。詳細な計算条件は次のとおりである。

a) 音源及び構造物の位置

実際の道路では自動車は複数の車線上を走行するが、アセスメントなど騒音の予測上は道路中央部に音源位置を仮定することが多い。そこで原点(0, 0)を道路中央部の路面上に設定し、音源は騒音予測と同様に原点位置の路面上0.3mに仮定する。また遮音壁は原点の両側7.5m位置に仮定する。

b) 計算範囲

騒音が問題となる高架側方、及び下方の空間に注目し、(x, y)座標で、

$$x = -10\text{m} \sim +40\text{m}, y = -15\text{m} \sim +15\text{m}$$

の範囲を計算範囲とする。

c) 音源周波数

A 特性自動車騒音(200Hz~2kHz, 1/3 Octave band 中心周波数)により計算する。

d) 計算要素長

$\lambda/8$ とする。ただし、 $\lambda/8 > 10\text{cm}$ の場合には1要素長=10cmとする。(境界要素法で遮音壁のような細長い構造物を境界に含める場合は、一要素長を境界幅以下にすることが要求される。なお、10cmは遮音壁の厚さである。)

e) 境界条件

橋面及び直壁遮音壁背面は完全反射とする。直壁遮音壁前面はグラスウールの吸音率をDelany-Bazley 則⁶⁾により計算し設定している。また、ノイズリデューサー部分はグラスウール+ガラスクロス+パンチングメタルの吸音率を実験値に基づき設定している。なお、高架道路の路面より下方で、遮音壁背面の延長線上の境界は完全吸音の条件を仮定している。また、地盤面は境界条件として与えず、自由空間中でのノイズリデューサーの効果に注目することとしている。

(4) 計算ケース

次の3ケースについて遮音壁背後の音場計算を実施した。

- ・ケース1 右側障壁が直壁(高さ3m)の場合
- ・ケース2 右側障壁が直壁(高さ3.5m)の場合
- ・ケース3 右側障壁がノイズリデューサー付障壁(ノイズリデューサーを含む高さ3.5m)の場合

(5) 解析結果

図3~図5はケース1~ケース3について境界要素法に基づき計算した音圧レベルを表したものである。音源から発生した音圧を距離1m点を基準(0dB)とし、それ

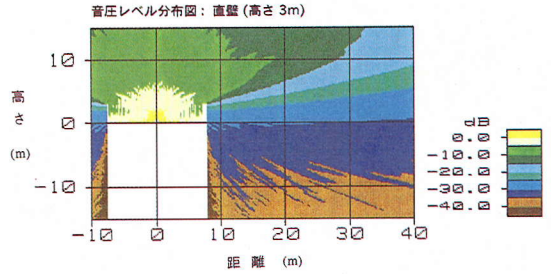


図-3 音圧レベル分布図(高さ3m直壁)

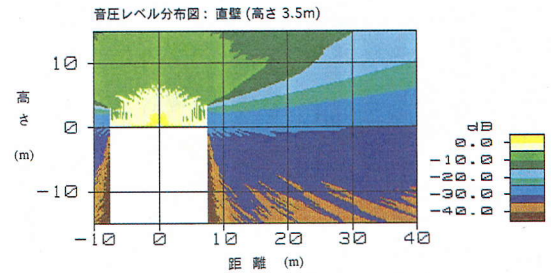


図-4 音圧レベル分布図(高さ3.5m直壁)

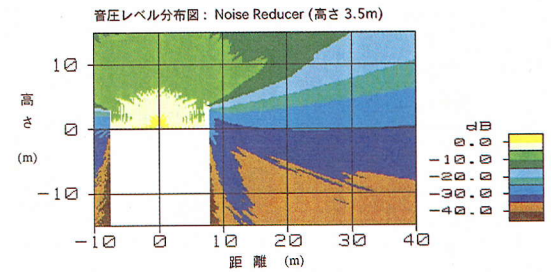


図-5 音圧レベル分布図(ノイズリデューサー含む 高さ3.5m)

に対する各地点の相対音圧レベルを等圧線をもって表したものである。3ケース共遮音壁により音源から発生した音が大幅に減音する様子が再現できている。それぞれのケースでの違いをさらに明確にするために各ケースの差を表したものが図6~図8である。図ではレベル差をインサージョンロスという用語で表現したが、これは音響装置がある環境に設置する際の設置前と設置後における音圧レベル差、すなわち低減量を示す。ここでは通常の遮音壁に新たな壁、またはノイズリデューサーを付加することによって生じる騒音低減量を意味する。各図の上部に音圧レベルの差し引きに用いた条件を示した。図6は高さ3mの直壁のケースと高さ3.5mの直壁のケースを比較したもので、直壁の高さを50cm高くした場合、遮音壁背後斜め上方の音圧が減じるが、経路差の大きい斜め下方の減音効果はさほどみられていない。一方、図7は高さ3mの直壁のケースと高さ3.5mのノイズリデューサー付障壁のケースを比較したもので、斜め上方への減音効果と共に斜め下方の2~3dBの減音

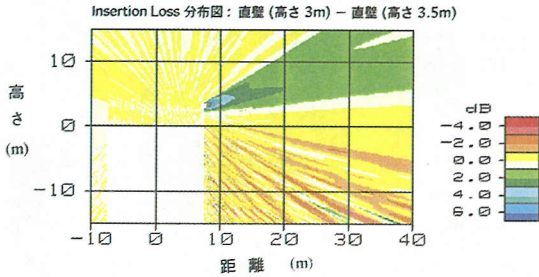


図-6 インサージョンロス分布図 [直壁 (高さ3m) - 直壁 (高さ3.5m)]

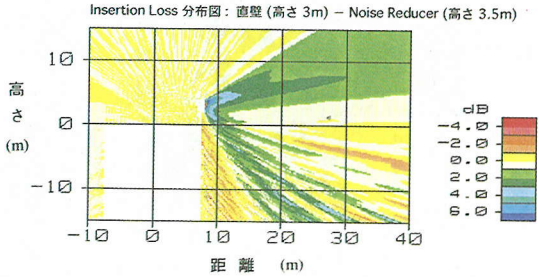


図-7 インサージョンロス分布図 [直壁 (高さ3m) - ノイズリデューサー付 (高さ3.5m)]

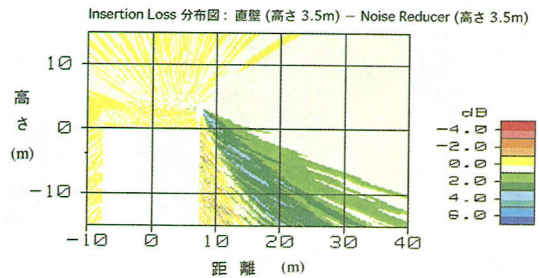


図-8 インサージョンロス分布図 [直壁 (高さ3.5m) - ノイズリデューサー付 (高さ3.5m)]

効果がみられる。実際に高速道路の高架橋で既設遮音壁の上にノイズリデューサーを設置した場合、ノイズリデューサー設置前に比べ遮音壁から20m離れた地点の1.2mで2~3dBの減音効果があったことが実測されており¹⁾、この実測結果と解析結果の傾向は概ね一致している。図-8は高さ3.5mの直壁のケースと高さ3.5mのノイズリデューサー付障壁のケースを比較したもので、同じ3.5mの高さの障壁ではあるが、ノイズリデューサーを設置した方が明らかに優れており、特に経路差の大きくなる地点では非常に効果が高いことがわかる。ノイズリデューサーの効果が高い地点は高速道路の高架橋梁近傍の住宅の位置にあたり、ノイズリデューサーを設置すればその効果が周辺住民の生活にただちに反映されることになる。

図-9~図-11はノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと遮音壁設置位置からの水平距離の関係を地盤からの高さごとに表したものである。この時、実

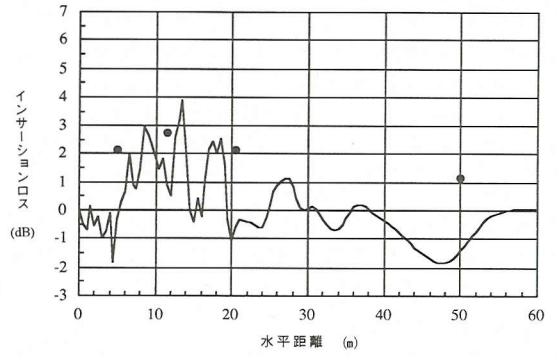


図-9 ノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと水平距離 (地上高1.2m)

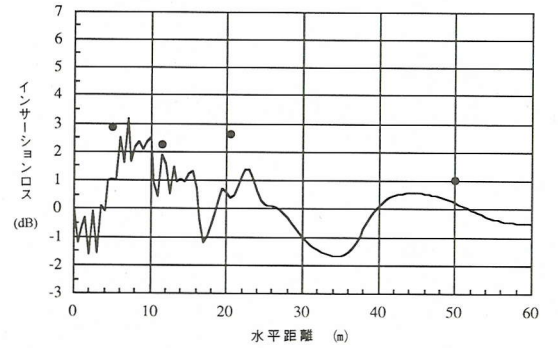


図-10 ノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと水平距離 (地上高3.5m)

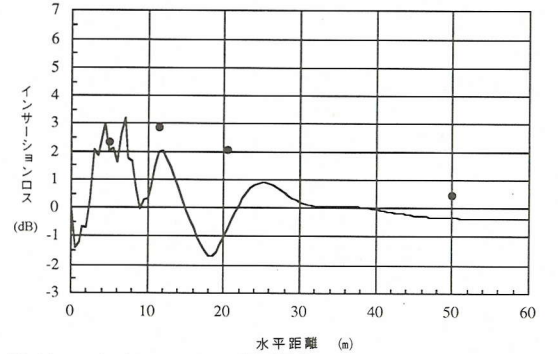


図-11 ノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと水平距離 (地上高7.0m)

際の道路の高さを考慮して、路面より10m下方の高さ面を地盤面と仮定している。また、図-12~図-14はノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと経路差との関係を表したものである。実線が境界要素法を用いた解析結果、黒丸印が実際に現地でも測定した結果である。現地の実測については高速道路の既設遮音壁の上にノイズリデューサーを設置してノイズリデューサーによる減音効果を計測したものであり、現地測定時の地盤からの高さ $P_y=1.2m, 3.5m, 7.0m$ の各ケースで比較している。図-9~図-11をみると遮音壁設置位置から50mまでの範囲で解析値には少し乱れがあり、また実測値よ

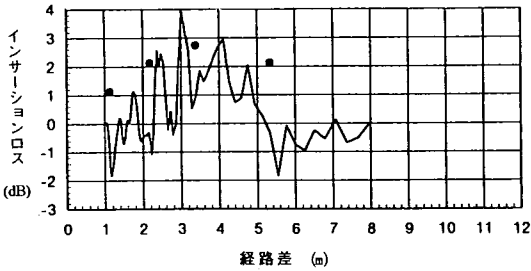


図-12 ノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと経路差 (地上高 1.2m)

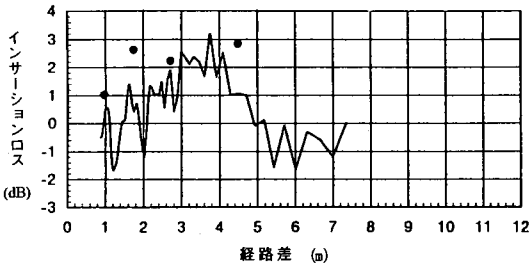


図-13 ノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと経路差 (地上高 3.5m)

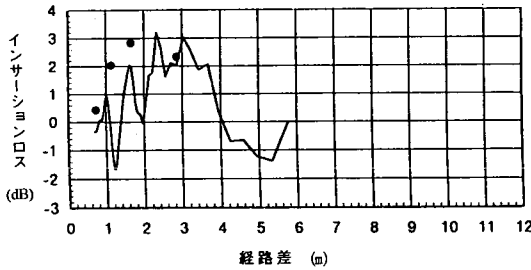


図-14 ノイズリデューサー設置前後のインサージョンロスと経路差 (地上高 7.0m)

りも多少低めの値を示しているが、全体的には両者は合う傾向を示している。また、経路差で比較した図-12~図-14では両者は定性的にも定量的にもほぼ一致しており、ノイズリデューサーの減音効果は経路差3~4mでピークを迎え、その位置で2~3dB減音することが示されている。

以上より、境界要素法を用いて遮音壁及びノイズリデューサーの背後の音場の状態を十分に表現することができると考えられ、境界を橋梁だけでなく実際の地形に合わせ設定すれば、現地にノイズリデューサーを設置する前にその減音効果を予測することも可能と考えられる。

4. まとめ

ノイズリデューサーの設置効果を確認するため、高速道路高架橋梁部での現地実験、境界要素法を用いた音場

の解析を行い、実験と理論の両方の立場から検討を行った。その結果は次のとおり要約される。

- (1) ノイズリデューサーは現地による実測結果からみても、また、数値解析結果をみても十分な騒音低減効果をもち、騒音対策上有効なものであることが確認された。特に、種々の制約により遮音壁の高上げが困難な箇所においては非常に有効なものである。
- (2) 境界要素法を用いた音場の解析結果は現地試験結果と比較的によく一致しており、境界要素法による数値解析手法が遮音壁背後の音場の状況を現すことが可能であることが判明した。また、本解析手法を用い地形、道路構造等の境界を変えることにより任意の現場でのノイズリデューサーの設置効果予測も可能であると考えられる。

今後の課題としては、ノイズリデューサーを現地に設置する場合の減音効果の予測が簡易にできるような表あるいは図の作成が必要であり、境界要素法を利用した数値解析モデルを活用して行う必要がある。簡易な予測図等が作成できれば、実用上ノイズリデューサーを効率的に活用することができることになるからである。

謝辞：今回の研究にあたり、数値解析の企画にご協力をいただいた小林理学研究所の山下充康理事長および担当いただいた同研究所の研究員各位に対し深く感謝いたします。また、境界要素法による理論計算にあたっては国立環境研究所の田村正行博士に有益なアドバイスをいただきました。重ねて感謝の意を表します。なお、今回の論文の取りまとめは、山口大学の中川浩二教授のご助言のもとに行われたものであることを末尾ながら付記させていただきます。

参考文献

- 1) 庄野, 吉田, 山本: 道路遮音壁先端に設置する騒音低減装置の開発, 土木学会論文集, No.504/VI-25, pp.81-89, 1994.
- 2) May, D.N. and Osman, M.M.: Highway Noise Barriers—New Shapes, Journal of Sound and Vibration, Vol.71, pp.73-101, 1980.
- 3) 藤原恭司, 小野一則: 円筒状エッジをもつ障壁による音波回折, 日本騒音制御工学会技術発表論文集, 昭和 51 年 12 月, pp.153-156, 1980.
- 4) 鏡慎, 森吉昭博, 深井一郎: 道路の防音壁における音響学的解析, 日本道路会議論文集, Vol. 18th, pp.50-51, 1989.
- 5) 西田公至: 有限長障壁による音波回折の境界要素分析, 日本音響学会誌, 1988.
- 6) Delany, M.E. and Bazley, E.N.: Acoustical properties of fibrous absorber materials, Appl. Acoust.3, 105-116, 1970.

(1996.5.27 受付)

ANALYSIS OF NOISE ABATEMENT DUE TO ABSORPTIVE DEVICE AT THE TOP OF HIGHWAY NOISE BARRIERS BY BOUNDARY ELEMENT METHOD

Yutaka SHONO, Yoshiro YOSHIMURA and Kohei YAMAMOTO

Efficiency of improved barrier called "Noise Reducer" was investigated by Boundary Element Method. The noise calculation was made to the condition that this device was mounted at the top of highway noise barriers. The results showed good agreement with the data measured at a real highway with the improved barrier of 3.5m height.