舗装版切断機騒音に対する変形 Y 型遮音壁の遮音効果

Sound shielding efficiency of noise barrier with improved Y-shaped edge against paving slab cutting machine noise

比江島慎二*, 木村亮** Shinji Hiejima, Ryou Kimura

*工博,岡山大学大学院准教授,環境学研究科資源循環学専攻(〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1) *岡山大学,環境理工学部環境デザイン工学科(〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

Edge-improved noise barriers are effective in reducing noises in the outdoor space. In this study, the noise barrier with an improved Y-shaped edge is applied to reduce the noise from paving slab cutting machines. A series of numerical analyses are conducted to examine the sound shielding efficiency of the noise barrier with the improved Y-shaped edge. It is found that the branch angle of the Y-shaped edge has considerable effect on the sound shielding effeciency. Sound absorbing materials attached on the Y-shaped edge can reduce the machine noise more effectively.

Key Words: edge-improved noise barrier, paving slab cutting machine, outdoor noise キーワード: 先端改良型遮音壁, 舗装版切断機, 屋外騒音

1. はじめに

都市における上下水道,ガス,電気,通信等のライフ ラインの多くは道路地下に埋設され,老朽化や定期的な メンテナンスのため,舗装版切断機による路面切断が頻 繁に行われる.その際,路面切断に使用される舗装版切 断機は非常に大きな騒音を発生し,特に夜間工事などに おいて,近隣に不快な騒音公害をもたらすことがある.

一方,交通騒音などの防音対策として,遮音壁が多用 されている.その中でも先端改良型遮音壁^{1)~6}は,低い 壁高でより高い壁高の遮音壁と同等な遮音効果が得られ ることから,日照権問題や電波障害が生じやすい都市内 幹線道路などで多く用いられている.様々な遮音壁先端 形状の工夫で高い遮音性能が得られ,騒音源の特性に応 じた先端形状が選択されることになる.このような先端 改良型遮音壁^{1)~6}の特長を活かせば,舗装版切断機騒音 に適した先端形状の採用により,低い壁高で可搬性が高 く,現場で簡易に設置可能な遮音壁を実現できる可能性 がある.

われわれは、沿道に高層の建物が密集した都市内道路 における舗装版切断作業を想定して、比較的高々度まで 高い遮音効果が得られる先端形状として変形Y型遮音壁 を提案し、その遮音性能について数値シミュレーション により検討してきた⁷⁾.単純壁、アクティブ制御型遮音 壁の1つであるアクティブソフトエッジ(ASE)遮音壁、 通常のY型遮音壁などと比較したところ、舗装版切断機 騒音に対して、単純壁やY型遮音壁よりも性能が高く、 ASE 遮音壁に匹敵する高い遮音効果が得られることが 明らかとなった.本研究では、変形Y型遮音壁の遮音性 能をさらに詳しく解明するため、特に遮音壁先端の分岐 角度を様々に変化させたときの効果、および先端部への 吸音材設置の効果について数値解析により検討した.また、解析に用いる音源の周波数特性についても、以前は 1/3 オクターブバンドレベルの中心周波数成分を対象と した大まかな解析であったが、本解析では騒音スペクト ルをもとに実際に音圧レベルが卓越する周波数成分だけ を対象に解析を行った.

2. 騒音源および遮音壁の解析条件

2.1 音源の周波数特性と解析対象周波数

国土交通省中国地方整備局によって実物の舗装版切 断機(クライム NO-40T)で測定された騒音の実測結果 から,音響伝搬解析に用いる音源モデルを作成する.測 定では,切断機を中心に半径 4m 離れた半球上に設置し た6カ所のマイクロフォンを用いて,往復2回の切断作 業を行った時の合計12個の騒音データが得られている. これらのデータに対し,式(1)のように測定値のパワー平 均をとることにより,音圧レベルの空間的な平均値を算 出する.



$$\overline{L} = 10 \log \left(\frac{1}{12} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{12}}{10}} \right) \right)$$
(1)

ここで、L1~L12 個の騒音測定データでの各音圧 レベルである. 平均化して得られた騒音スペクトルを図 -1 に示す. なお, 6 ヶ所のマイクロフォン測定位置に おいて、それぞれの位置の騒音スペクトルに大きな違い はないことを別途確認している.以前の解析では 1/3 オ クターブバンドの中心周波数を遮音対象とした概略的 な解析を行ったが、本解析はこの騒音スペクトルにもと づいて、実際に卓越する周波数成分を対象としたより詳 細な検討を行う. 図-1によれば,多くの卓越周波数成分 が見られるが、このうち特にパワーの大きい94Hz、291Hz、 319Hz, 388Hz, 409Hz, 425Hz, 447Hz, 475Hz, 500Hz, 519Hz, 541Hz, 566Hz, 609Hz, 634Hz, 650Hz, 659Hz, 716Hz, 847Hz, 1103Hz, 1131Hz, 1156Hz, 1184Hz, 1316Hz, 1331Hz, 1394Hz, 1419Hz, 1428Hz, 1628Hz, 1756Hz の合計 29 成分を対象と する. なお, 設置状況や使用方法により騒音スペクトル の特性が多少変化する可能性はあるものの、これらの卓 越周波数自体に大きな変化はないと考えられ、今後、同 じ切断機を用いて実測による遮音効果の検証などを行 う場合には、やはりこれらの卓越周波数成分が重要とな る. これらの各周波数成分について、実測と同様に音源 から 4m 離れた地点で図-1 と同じ音圧レベルとなる強 さの点音源を解析において決定した. ところで, 実測結 果には暗騒音が含まれるが、その音圧レベルは切断機騒 音の音圧レベルに比べて 10dB 以上小さかったため, 暗 騒音に関する補正は行っていない.

2.2 解析モデルと解析条件

解析対象とする変形 Y 型遮音壁は、都市部の高い建物 上層部などでも高い騒音低減効果が得られることを期 待して、遮音壁先端の多重回折効果がより高い位置の受 音領域にまで及ぶようにY型遮音壁の分岐方向を音源側



に傾けて改良したものである.以前の著者らの研究⁷で は、舗装版切断機騒音に対し、アクティブノイズコント ロールの1つであるアクティブソフトエッジ (ASE) 遮 音壁に匹敵する高い遮音性能が得られることが明らか となっている.本解析で用いる変形 Y 型遮音壁のモデル とその比較に用いる単純壁のモデルを図-2 に示す.い ずれも、舗装版切断作業のしやすさと現場への可搬性を 考慮して全高を 2.0m としている.変形 Y 型遮音壁の分 岐部は地面から高さ 1.5m の位置に音源側に向けて設け る.分岐部の長さは 0.5m で先端をとがらせ、分岐部の 水平からの角度 = 30°, 45°, 60°, 75°について解析する.

遮音壁周辺の音場解析には境界要素法にもとづく数 値音響解析ソフトLMS SYSNOISE を用いて,対象周波 数ごとに周波数領域で解析する.解析領域の概要を図-3 に示す.地表面境界は上下対称条件を与えることで完 全反射境界とする.また,遮音壁は音源の左右に対称に 設置することを想定し,鏡像の原理から,音源を通る垂 直軸を中心に左右対称条件を与える.すなわち,地表面 境界と同様,音源を通る垂直軸に完全反射境界を仮定す ることになる.遮音壁表面も,吸音材を設置する場合以 外,完全反射である.騒音源は点音源として地表面上に 置く.遮音壁の設置位置は切断機による作業のしやすさ



図-4 音圧レベル分布の例 (d=1.0m, 上段からそれぞれ 447Hz, 716Hz, 1156Hz, 1184Hz)

を考慮して,音源からの水平距離 d = 1.0m, 1.5m の 2 通 りとした.解析領域内には,遮音効果を評価するため, 音源からの水平距離 3m,鉛直距離 1m の位置を起点とし て 1m ごとに水平・鉛直の各方向に 20 分割した合計 400 点の格子状の評価点を設定している.波長が 1m 以下と なる高周波数成分などに対しては、より細かい間隔の評 価点を設定するのが望ましいが、400 点もあればある程 度平均的な評価結果が得られると考えられることや今 後の実測との比較検証の可能性などを考慮して、この程 度の間隔や点数が現実的と判断した.大気の気温 18℃、 密度 1.2kg/m³、音速 340m/s として解析した.

なお、本解析は2次元解析であるため、3次元的に見

れば奥行き方向に無限に続く遮音壁を仮定することに なり、点音源も3次元的には線音源に相当する.したが って、通常は有限長さとなる現実の遮音壁の音場条件と は必ずしも等価ではない.しかし、本解析では変形Y型 遮音壁の分岐角度や壁表面への吸音材設置などが遮音 効果に与える影響について、基本的な遮音特性を把握す ることが主目的であり、遮音性能を定量的に評価するた めには2次元の単純な解析モデルが望ましいこと、3次 元解析では膨大な計算容量を必要とすること、2次元と 3次元で遮音性能の傾向に極端な違いが出るとは考えに くいことなどから、2次元解析で検討することにした. 解析による評価では2次元の範囲にとどめ、さらに複雑 な3次元的な効果を検証するには実測で検証するのが現 実的と考えられる.

ところで、十分な精度の解を得るには、遮音壁表面の 境界要素分割数は、音の1波長の長さに対して最低でも 6 分割程度の分解能が必要であり、精度を高めるにはさ らに多くの分割が求められる.前述の解析対象周波数は いずれも 2000Hz 以下であるため、2000Hz の音の波長に 対して 10 分割程度の空間解像度から徐々に分割数を増 やして遮音壁設置時の音場を解析する予備解析を行っ たところ、1 波長 50 分割まで解像度を高めれば、評価点 における音圧解がほぼ一定値に収束することが別途明 らかとなった.よって、本解析では 2000Hz の音の1 波 長 50 分割に相当する 0.0034m 長さの境界要素を用いて 遮音壁表面を分割した.

3. 遮音効果に関する解析結果

3.1 音圧レベル分布

音源から遮音壁までの距離*d*=1.0m として,単純壁と 変形 Y 型遮音壁(分岐部角度*θ*=30°,75°)について,図 -3 の評価点領域付近の音圧レベル分布を示したのが図 -4 である.音源のパワーが大きい上位 4 つの周波数 447Hz, 716Hz, 1156Hz, 1184Hz についての解析結果であ る.

いずれのケースも、遮音壁先端を回折した音とそれが 地表面で反射した音による干渉縞が音のほぼ半波長に 相当する間隔で現れている.これらの図ではいずれの周 波数でも、 *θ*=30°の変形 Y 型遮音壁を用いた場合に、特 に遮音壁先端から斜め上方に向かう方向より下層の領 域で音圧レベルが顕著に低下しており、全体的な遮音効 果が高いように思われる.

3.2 先端分岐角度の影響

変形Y型遮音壁の分岐部角度が遮音効果に及ぼす影響 を定量的に評価するため、分岐部角度が異なる様々なケ ースにおいて図-3 に示した 400 点の評価点における挿 入損失を求めた.挿入損失とは、遮音壁設置前後のその 点における音圧レベルの差から求めた音圧レベル低下 量であり、その点に対する遮音壁の遮音性能を表す. なお、評価点は400点もあることから、図-5に示すようにA~Dの4つの領域に分け、各領域100個ずつの評価点の音圧から算定した挿入損失の算術平均により遮音効果を評価した. なお、分岐部角度は現場での舗装版切断作業のしやすさなどを考慮して θ = 30°, 45°, 60°, 75°の4ケースについて解析した.

図-6に今回対象とした29個のすべての周波数成分に 対するオーバーオールレベルでの挿入損失平均,図-7 および図-8には周波数ごとの挿入損失平均を示す.図 -6によれば、いずれの分岐部角度の場合も単純壁に 比較して遮音性能の向上が見られる. *θ*=30°が最も遮音



図-6 オーバーオールでの挿入損失平均



図-7 周波数ごとの挿入損失平均 (d=1.0m)



図-8 周波数ごとの挿入損失平均 (d=1.5m)





(a) d=1.0m
(b) d=1.5m
図-10 遮音壁設置位置による遮音効果の違い
(変形 Y 型θ=45°, 1156Hz)

効果が高く、θが大きくなってY型分岐部の先端開きが 閉じるほど遮音効果が低下する傾向が見受けられる.た だし、A領域に対しては、むしろθ=75°が高い遮音効果 を示している.なお、本解析で考慮した29個の周波数 成分のうち、図-1の音圧レベルが最低と最高の成分の差 は約9dBに及ぶため、29個以外のさらに音圧レベルの低 い周波数成分を考慮しても、オーバーオールレベルで見 た図-6の結果にはそれほど変化はないと考えられる.

図-7と図-8のA領域における挿入損失で見ると, *θ* = 75°はほとんどの周波数域において挿入損失が正の値を示すのに対し, それより小さい*θ* では周波数によっては挿入損失が大きく負の値を示すことがある. これに起因して, 各周波数成分のパワー和である図-6 のオーバーオールレベルではA領域での*θ*=75°の遮音効果が他の *θ*に比べて相対的に高くなったと考えられる. なお, *θ* による遮音壁先端の開きと音波の波長との関係に起因して, 共鳴などの影響が出る可能性があるが, 図-7 と 図-8 を見る限りは, 共鳴の影響と思われるような挿入 損失の規則的な変化は見られない.

図-7によれば、A領域で θ = 30°よりも θ = 75°の遮音 効果が高くなる周波数の例として1156Hzや1184Hzがあ る.このときの音圧分布を図-4で見ると、 θ = 30°の場合 は低高度の C, D領域への遮音効果が高いものの、遮音 壁の真上方向に相当するA領域付近ではむしろ θ = 75°よ り遮音効果が低下する様子がうかがえる。変形 Y 型遮音 壁では、遮音壁先端の分岐による二重回折効果が遮音性 能を高める働きをすると考えられるが,音源位置と遮音 壁分岐端との位置関係により,二重回折の効果が及ぶ範 囲は主に低高度のC,D領域となる.しかし, θ = 30°と θ = 75°では図-9 に示すように先端部での回折経路に違い があるため,二重回折の効果が及ぶ範囲が異なり, θ = 75° では効果の及ぶ範囲が C,D領域のさらに低層部分に限 られる.そのため,C,D領域に対する遮音効果は θ = 30° の方が高くなると考えられる.ところが, θ = 30°はC,D 領域への音の伝搬が θ = 75°に比べて抑制されやすい分, 図-4 に示したように,周波数によっては高々度のA,B領 域に音が集中する傾向がある.このことが,図-6 で見た ようにA領域において θ = 75°の遮音効果が他の θ に比べ て高くなる要因と考えられる.

3.3 遮音壁設置位置の影響

図-6を遮音壁の設置位置*d*=1.0m, 1.5mの違いで比べると、それほど大きな違いは見られないが、B領域を除いて*d*=1.0mの方がわずかに高い遮音効果を示す傾向がある.B領域に関して図-7を見ると、*d*=1.0mでは周波数によっては極めて高い挿入損失が得られる一方、挿入損失が強い負の値を示す周波数も存在するのが分かる.それに対して、図-8の*d*=1.5mの場合には、B領域の挿入損失が極端に強い負の値を示すことはほとんどない.

B領域に対する d=1.0m の挿入損失が負となる例とし て、 図-7によれば $\theta=45^{\circ}$ の 1156Hz のケースがあり、 そのときの評価点領域の音圧レベル分布をd=1.5m と比 較して示したのが図-10 である. C, D 領域に相当する低 高度領域に対する遮音効果はd=1.0m の方が高くなる一 方、前節で見たような高々度領域への音の集中により、 遮音壁先端から領域右上部のB領域に相当する付近にか けて、d=1.5m に比べると高い音圧レベルの領域が見ら れる. この音の集中が、B 領域に対する遮音効果の低下 につながっていると推定される.

3.4 吸音材の効果

遮音壁先端部に吸音材を設置すると高い遮音効果が 得られることが知られている⁸⁾. そこで,図-11のよう に変形Y型遮音壁の先端分岐の各部分に吸音材を設置し たI~VIの設置パターンについて検討した.解析では, 吸音材の効果はアドミッタンス境界条件として扱い,実 際の吸音材を参考に仮定した図-12のような周波数特 性を有するアドミッタンスを与えた.

d=1.0m, θ=30°, 75°の変形 Y 型遮音壁について,図-11 の吸音材の各設置パターンに対する遮音効果を解析 した.すべての周波数成分に対するオーバーオールレベ ルでの挿入損失平均を図-13 に示す.ほとんどの吸音材 設置パターンで,吸音材なしの場合に比べて数dB程度, 遮音効果が向上している.吸音材を先端分岐部だけに設 置した I~III のパターンを比べると,分岐部の上面に吸



音材を設置したIIよりも下面に吸音材を設置したIやIII の遮音効果が高いことが分かる.IV~VIを比べた場合も 同様に分岐部下面への吸音材の設置が効果的である.特 に,IVとVIの挿入損失はほとんど同じ値となっており, VI において分岐部上面に設置した吸音材はほとんど機 能していないことが示唆される.分岐部下面には音源か らの直接波が入射するため,高い吸音効果が得られたと 考えられる.また,分岐部下面に吸音材を設置していな いIIとVのパターンは,A,B領域において,吸音材無 しのケースに比べて遮音性能の向上がほとんど見られ ない.

ところで、図-6に示したように、本来 θ =75°のケースは θ =30°に比べて遮音性能が劣るが、図-13で両者を比べると、IIとV以外のパターンを用いれば θ =30°のケースに匹敵する高い遮音効果が得られることが分かる. やはり先端分岐部下面への吸音材の設置が、遮音性能の向上に大きく寄与することを示している. なお、I~II とIV~VIの比較から、分岐点より上方の直立部および その先端部への吸音材の設置は、1~2dB程度の遮音性能の向上効果があるのが分かる.以上より、コストパフォ ーマンスから判断すれば、IVの吸音材設置パターンが最 も望ましいと言える.

4. まとめ

舗装版切断機騒音に対し,現場設置型のコンパクトで 可搬性の高い遮音壁の実現を目的として新たに提案し た変形 Y 型遮音壁に関して, 現場測定した騒音源の卓越 周波数成分に着目し、先端分岐角度や先端部に設置した 吸音材の効果を境界要素法にもとづく2次元数値解析に より詳細に検討した. その結果, 以下の知見が得られた. (1) 先端 Y 型分岐部の水平からの角度 = 30°, 45°, 60°, 75°について解析したところ、ほとんどのケースで単純壁 よりも高い遮音効果が得られた. 主な周波数成分のオー バーオールレベルで見ると、特に θ =30°の効果が高く、 より大きな θ でY型の開きが閉じたケースほど遮音効果 が低下する傾向が見られた. ただし, 遮音壁の真上方向 の領域に対しては、θ=75°が高い遮音効果を示した. (2) 遮音壁の真上方向の領域において、 θ = 75°での挿入 損失はほとんどの周波数域で正の値を示すのに対し, θ= 75°よりも小さい角度では周波数によっては挿入損失が 大きく負の値を示すことがある.このことに起因して, オーバーオールレベルでは遮音壁真上方向の領域に対 する θ = 75°の遮音効果が他の θ に比べて相対的に高くな っている.

(3) 遮音壁先端分岐による二重回折の効果が低高度の広 い範囲に及ぶ θ= 30°などでは、低高度の受音領域への音 の伝搬が顕著に低減される分,二重回折の効果が及ばな い遮音壁上方への音の伝搬集中が生じやすい.それに対 して, θ =75°の場合は低高度の受音領域に対する遮音効 果が低い分,このような遮音壁上方への音の過度な集中 が生じにくいため,遮音壁真上方向に対する遮音効果が θ =30°などよりも相対的に高くなったと考えられる.

(4) 音源から遮音壁までの距離 d=1.0m と 1.5m では, d= 1.0m の方がわずかに高い遮音性能を示す傾向があるも のの,遮音壁先端から斜め上方の受音領域に対しては, d=1.5m の方の遮音効果が高い. d=1.0m の場合, (3)に 述べたのと同じ上方領域への音の集中に起因して,周波 数によってはこのような遮音壁斜め上方領域での挿入 損失が大きく負の値を示すことがある. そのため,この 斜め上方領域で d=1.5m に比べて遮音効果が低くなった と考えられる.

(5) 遮音壁先端部への吸音材の設置により,吸音材を設置しない場合に比べて数 dB 程度の遮音効果の向上が見られた.特に,先端分岐部下面への吸音材の設置が遮音性能向上に有効である.一方,先端分岐部上面に設置した吸音材はほとんど遮音効果に寄与しなかった.また, θ = 30°などに比べて遮音性能で劣る θ = 75°であっても,吸音材の設置により θ = 30°とほぼ同等の高い遮音効果が得られることが分かった. θ = 75°の方が切断時の作業スペースを広く確保できるため,同等の遮音性能が得られるのであれば,現場の作業環境の面で優れた θ = 75°が有利と考えられる.

なお、舗装版切断機騒音の低減を目的とした現場設置 型の遮音壁を実用化するには、本解析の結果を踏まえ、 今後さらに実測などによる検証が必要と考えられる.また、3次元的な効果やより遮音性能の高い先端形状の検 討なども今後の検討課題である.

謝辞

本研究は国土交通省中国地方整備局の受託研究によ り行われるとともに、舗装版切断機騒音の実測データを 提供していただきました.ここに深く謝意を表します.

参考文献

- 比江島慎二,井保大志:遮音壁先端プレートが遮音性 能に及ぼす影響,構造工学論文集, Vol.50A, pp.369-374, 2004.
- 2) 比江島慎二,平川陽介,井保大志,濱野陽一郎:フェ アリングプレート型遮音壁の遮音性能,第18回風工 学シンポジウム論文集,pp.425-430,2004.
- 大久保朝直,藤原恭司:ソフトな円筒エッジを持つ防 音壁の遮音性能,日本音響学会誌,52巻12号,pp.957 -966,1996.
- 山本貢平:新型遮音壁の現状とコンペの方法について、 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-97-31, pp.1-18, 1997.
- 5) 堀田竜太,山本貢平:集合パイプ型吸音体の減音効果 に関する研究,日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-97-32,1997.
- 6) 金哲煥,藤原恭司:上端に音響管配列を持つT型防音 壁の遮音性能に関する研究,日本音響学会騒音・振動 研究会資料,N-97-34,1997.
- 7) 比江島慎二,一色威輝:舗装版切断機騒音に対する先端改良型遮音壁の効果,応用力学論文集,Vol.11, pp.243-250,2008.
- (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,土木学会論文集,No.574/VI-36, pp.15-20, 1997.

(2009年9月24日受付)