

トンネル坑内における発破音の 音圧スペクトルレベル予測式の提案

石田 滋樹¹・柿木 寛也²・進士 正人³

¹正会員 中電技術コンサルタント(株) 道路部 (〒734-8510 広島市南区出汐二丁目3-30)
E-mail: ishida@cecnet.co.jp

²学生会員 山口大学大学院 理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: r009vf@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 山口大学大学院 理工学研究科(〒755-8611 宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

施工中のトンネル坑口部に設置される防音扉の騒音低減効果は、SEA法を用いた騒音振動連成数値解析によって防音扉の周波数ごとの音圧低減効果を実用的に解析できる。しかし、数値解析の入力値として発破音の音圧スペクトルレベルが必要となるため、SEA法による数値解析は施工段階での適用に限られ、計画段階での騒音低減解析ができない課題があった。本研究では、山岳トンネルの建設現場において、トンネル縦断方向の発破音の音圧伝達状況を連続測定した。そして、総火薬量とトンネル坑内の発破音圧レベル減衰の周波数特性を分析し、この結果に基づき、発破音の音圧スペクトルレベル予測式を新たに提案し、その適用性を検証する。

Key Words : *statistical energy analysis method, sound insulation door, tunnel construction, sound pressure spectrum level, multiple regression analysis*

1. はじめに

山岳トンネルを発破工法で掘削する場合、発破による爆破エネルギーの一部は、低周波音を主体とする音圧となってトンネル内の空気を伝播し、坑口から周辺地域に伝達していく。そのため、住宅地近郊など、近隣への環境保全が必要な地域での山岳トンネル施工では、高度な騒音対策が要求される。

トンネル工事における発破音対策には、火薬量の調整や装薬方法の工夫、段発時間の設定といった音源対策と、防音扉による伝達経路遮断対策がある。音源対策は根本的な発破音対策の解決方法のひとつであるが、様々なノウハウが必要となるうえ、効果の信頼度には課題もあり、実施工への影響も大きいことから、主に防音扉の音響透過損失によって騒音を低減する伝達経路遮断対策が採用されている。

トンネル防音扉の音響透過の原理は、発破により発生する音響パワーが防音扉を励振し、その振動により反対側の音響空間に向かって音響パワーが伝達するメカニズムである。従来は、このような防音扉の騒音振動連成問題を実用的に解析する数値解析手法は確立されていなか

った。そのため、計画段階での一般的な防音扉による騒音対策検討では、経験式によって算出した騒音予測値が騒音規制値を超過すれば、防音扉遮音材の公称値、もしくは経験値による音圧レベル低減値に応じて設置枚数を決定する、経験的な方法が一般的に採用されてきた。そして、実施工において事前予測した低減効果が得られなかった場合には、コンクリート吹付けによる防音扉の重量や剛性の増加、設置枚数の追加など、経験的に試行錯誤しながら騒音低減対策が実施されているのが実態であった。しかし、防音扉は重厚で設置費用も高価であり、迅速な対応が必要となる施工現場において、経験に頼る試行錯誤は時間的にも経済的にも最適な方法とは言い難い。もし、数値解析による騒音予測シミュレーションが可能であれば、現場での試行錯誤を削減することができ、時間とコストの大幅な縮減と、新しい騒音低減技術の開発への利用などが期待できる。

しかし、このようなケースでこれまで適用が検討される数値解析手法は音響FEMが一般的であり、精度よく解析するためには、膨大な節点を持つ3次元トンネルモデルを精密に作製した上で、解析荷重が大きな数値解析を実施することとなるため現実的ではなく、より実用的な音

響予測シミュレーションの確立が求められていた。

そこで、筆者らは、主に航空宇宙分野において開発された統計的エネルギー解析法 (Statistical Energy Analysis Method, 以下“SEA法”と略称する) のトンネル発破音解析への適用を試み、初めてその実用性を確認した¹⁾。

SEA法とは、騒音振動連成問題において、解析対象とする振動系 (System) を要素 (Subsystem) ごとに離散化し、周波数帯ごとの要素間のパワーフローがエネルギーの差に比例するとした、エネルギー保存則に基づいた解析手法である。この解析手法を簡単に説明するため、最も単純な2つの要素からなる系の要素間のパワーフローの平衡状態を図-1に例示する。系外から要素への入力パワーをそれぞれ P_{01} , P_{02} , 散逸パワーを P_{d1} , P_{d2} , 伝達パワーを P_{12} , P_{21} とすると、パワー平衡式は次式で表わされる。

$$P_{01} = P_{d1} + (P_{12} - P_{21}), \quad P_{02} = P_{d2} + (P_{21} - P_{12}) \quad (1)$$

SEA法は、式(1)を基本として各要素のエネルギー状態を算出する手法であり、厳密なモデル化が不要で、大空間の解析であっても要素分割数が極めて少なく済み、計算負荷が少ないことが特徴である^{2,3)}。トンネル音響解析でのモデルイメージを図-2に示す。

このSEA法を用いた数値シミュレーションによって、設置枚数の追加や扉重量増加などの防音扉の機能向上対策を迅速に検討することが可能となった。

しかし、SEA法の入力データとして必要な発破音の音圧スペクトルレベルを予測する手法が見当たらないため、施工前での予測解析に適用が難しいことが課題であった。

本研究では、山岳トンネルの建設現場において、トンネル縦断方向の発破音の音圧伝達状況を連続測定した。そして、総火薬量とトンネル坑内の発破音圧レベルの減衰の周波数特性を統計分析し、この結果に基づき、発破音圧スペクトルレベル予測式を新たに提案し、別のトンネルでの発破音データを用いてその適用性を検証する。

2. 発破音推定の現状と課題

一般に、音は周波数によって図-3のように区分される。このうち、100Hz以下の低周波音は、不眠や頭痛、不快感など人体への心理的、生理的な悪影響が指摘されている⁴⁾。このため、実務でよく用いられているトンネル発破音の推定提言式 (以下、“従来式”と略称する) では、式(2), (3)のとおり、人間の聴覚の特性を反映した周波数重み付け (以後、A特性と称す) による騒音レベルと、周波数重み付けを行わない低周波音レベルに分類されている⁵⁾。

$$L_A = A_A + 16 \log W - 16 \log D - 20 \log R + \Delta L \quad (2)$$

$$L_C = A_C + 7 \log W - 20 \log R + \Delta L \quad (3)$$

ここで、 L_A : 騒音レベル(dB(A)), A_A : 雷管種類により変わる騒音レベルの定数[DS雷管の場合: 130, MS雷管の場合: 136], L_C : 低周波音レベル(dB(F)), A_C : 雷管種類により変わる低周波音レベルの定数[DS雷管の場合: 141, MS雷管の場合: 148], W : 総火薬量(kg), D : 坑内距離(m), R : 坑外距離(m), ΔL : 指向性補正值(dB)。また、この低周波音レベルとは、周波数125Hz以下の音圧レベルのことを指している⁵⁾。発破音は100Hz以下の成分が支配的であり、100Hz以上の音圧は全周波数帯域の合成音圧レベル (Overall Value, 以下OA値と略称する) に対してほとんど寄与しない¹⁾ことから、ここでの低周波音レベルは、発破音の音圧レベルと同義と考えてよいため、以後は音圧レベルと称する。

これら式(2), (3)は、騒音計で得た音圧波形を周波数分析せずに直接実効値計算した値 (Allpass Value, 以下, AP値と略称する) を統計分析した回帰式であり、発破音圧レベルの周波数特性は得られない。発破音の推定には上式以外の提言式もあるが、いずれの式も概ね同様である。

このように、従来の騒音予測や対策検討では、騒音レベルと音圧レベルに分類しているものの、発破音の周波数特性はあまり意識されてこなかった。そもそも、音は

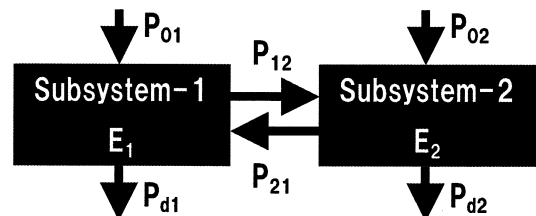


図-1 要素間のパワーフロー平衡状態

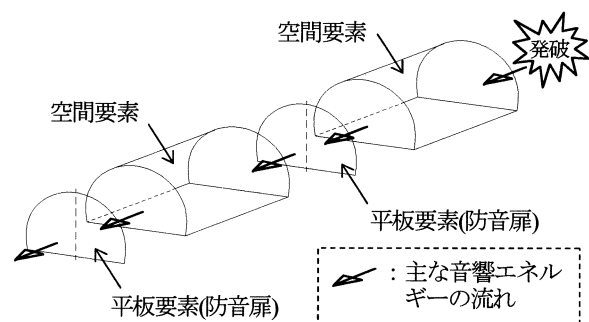


図-2 SEA法によるトンネル解析モデルイメージ

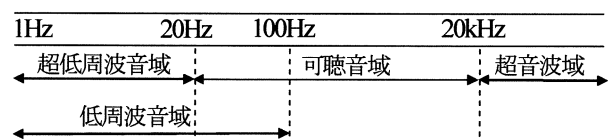


図-3 音域の分類

周波数によって音響透過特性が異なるため、防音扉による騒音対策は、音の周波数特性に応じた的確な対策が必要である。しかし、そのために必要となる発破音のスペクトルレベルを予測する手法は見当たらない。

このように、今まで発破音の周波数特性予測手法が確立してこなかったのは、防音扉の音響透過性能を周波数帯域ごとに実用的に解析できるSEA法のような手法が見当たらなかったことも理由の一つと考えられる。

3. 現場計測

現場計測は、発破掘削で施工されている全長約2.1kmの2車線自動車専用道路トンネルにおいて、掘削延長が1.36kmから1.44kmの間の約80m区間の発破掘削で実施した。坑口周辺の民家と学校への騒音対策として、坑口付近に防音扉が2基設置してある。含水爆薬を使用し、総火薬量は68.55kg~133.65kgであった。これは、防音扉を設置している発破掘削の現場としては一般的な使用量と思われる。また、DS雷管を使用し、段発数は10段である。

トンネル内の任意地点における発破音圧レベルの周波数特性を分析することを目的とし、低周波音計をトンネル縦断方向に約200m間隔で6箇所設置(図-4中、P1~P6)し、この区間のトンネル坑内の発破音を低周波音計にて自動計測した。低周波音計はリオン(株)社製のNA-17とNA-18、データレコーダはTEAC(株)社製のes8を用いた。サンプリングレートは5kHz、発破前1秒、発破後9秒の計10秒間の音圧を記録した。設置状況を写真-1に示す。

音圧測定時の暗騒音は60dB程度であり、発破音より十分に低いため、測定値への影響はない。

本研究の目的が発破音圧レベルの周波数特性の分析であるため、収集した音圧データの分析は、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, 以下FFTと略称する)分析により周波数ごとに分離し、この結果を用いて1/3オクターブバンドで合成し、各発破ごとに音圧スペクトルレベルを作成した。音圧レベルを合成する算出式を次式に示す。

$$L = 10 \log_{10} \left(\sum_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (4)$$

ここに、 L_i : 周波数ごとの音圧レベル(dB)

この時、防音扉からの反射音の影響を確認するために、FFT分析時間幅を、0(S)~3(s) (10段発による音源発生時間程度)とした場合と、0(S)~9(s) (データ収集最大時間)とした場合で分析結果を対比した。その結果、音圧スペクトルレベルの差は全測定箇所1dB未満であった。つまり、合成音圧レベルには防音扉からの反射音は影響していないことがわかる。

4. 発破音の全周波数帯域合成音圧レベル予測式

今回計測した発破音データの音圧レベルの特性を確認するために回帰式を作成し、従来式と対比した。

まず、各発破ごと、各測定位置ごとの音圧スペクトルレベルから式(4)を用いて音圧レベルのOA値を算出する。次に、この音圧レベルを目的変数として、総火薬量と切羽からの坑内距離を説明変数とした重回帰分析を実施した。

分析の結果、式(5)に示す回帰式を得た。重相関係数Rは0.87となり、高い相関を示しているものと考えられる。実測値と式(5)による予測値との比較を図-5に示す。

$$L_c = 134 + 0.07W - 0.004D \quad (5)$$

ここで、 L_c : トンネル坑内の音圧レベル(dB(F)), W : 総火薬量(kg), D : 坑内距離(m)

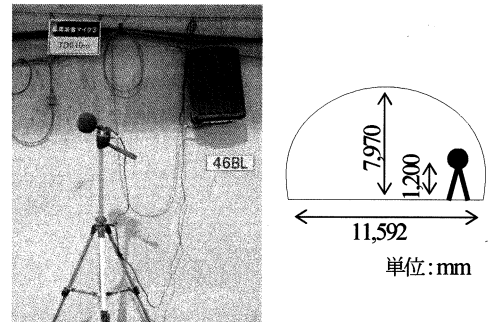


写真-1 低周波音計設置状況

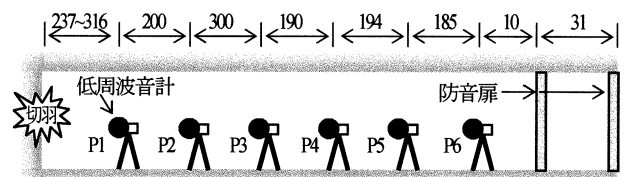


図-4 低周波音計設置位置図(坑内距離:m)

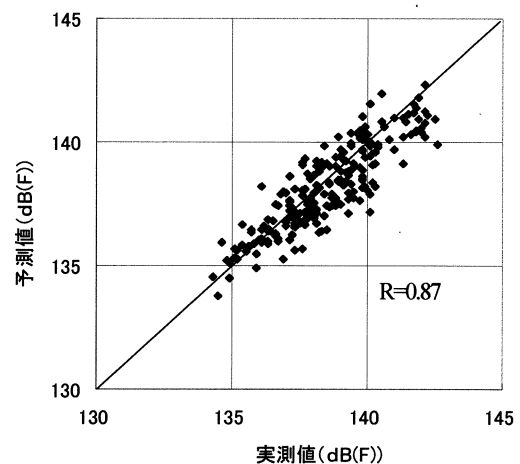


図-5 音圧レベルの実測値と予測値の比較

これを従来式と対比する。ここで、従来式で得られる音圧レベルはAP値であり、本予測式で得られる音圧レベルはOA値である。算出方法は異なるが、どちらも音圧レベルの実効値であるため、実用上、そのまま対比できる。

従来式は、式(2)の騒音レベルと式(3)の音圧レベルを使い分けてある。本実験から得た式(5)は音圧レベルを対象としているので、式(3)との対比となる。

従来式においては、音圧レベルはトンネル坑内では減衰しないが、式(5)ではトンネル坑内の音圧レベルの減衰が明瞭に現れている。これは、実測データの切羽と音圧測定位置の距離が関係していると想定される。つまり、従来式が用いた実験データは切羽からの距離が約70~250mである⁴⁾のに対し、今回の現場計測では切羽からの距離が237m~1,385mであり、従来式の実験範囲はほとんど含まれていない。このことから、従来式の現場実験で確認された音圧レベルの減衰特性の適用範囲は250m程度までとする必要があると考えられる。

以上、本現場計測データから、検討延長が長いために従来式の適用が難しいと考えられるトンネルに対して、新たな音圧レベル予測式が得られた。ただし、この式の適用範囲は、現場測定状況と同等な、切羽と音圧測定位置の距離が200m程度以上1400m程度以下とすべきである。

また、本測定結果をA特性で補正すれば、同様の重回帰分析から騒音レベルの予測回帰式も構築可能である。

5. 発破音の音圧スペクトルレベル予測式

(1) 音圧レベル減衰状況の特徴に基づく検討方針

トンネル縦断方向の測定位置ごとに実測した音圧レベルの値には、総火薬量と距離減衰、および周波数特性が複雑に関与するため、音圧伝達の特徴をうまく分離することは容易ではない。そこで、まずは発破音の1/3オクターブバンド音圧スペクトルレベルから、周波数帯域ごとの音圧レベルの距離減衰傾向を確認する。対象とする周波数帯域は、音圧レベルのOA値への寄与が支配的な100Hz以下の低周波音に対して若干の余裕をみて500Hzまでとする。

図-6は、トンネル坑内における音圧レベルの減衰状況を、主な周波数帯域ごとに整理した結果である。図からわかるように、発破位置の進行や総火薬量の違いなどから音圧レベルに幅が認められるものの、トンネル坑内の距離減衰特性は、周波数を f として、概ね $f \leq 4\text{Hz}$ 、 $4\text{Hz} < f < 80\text{Hz}$ 、 $80\text{Hz} \leq f$ の周波数帯域で異なる挙動を示している。

この区分のうち、距離減衰傾向がある場合は、坑内距離と総火薬量、当該周波数を説明変数とした重回帰分析によって、最も相関の高い関数を選定する。一方、距離減衰傾向がない場合には、総火薬量と当該周波数につい

て、同様の方法で相関関数を選定する。

このような特性を踏まえ、予測式構築の検討方針を以下とした。

a) 周波数帯域 $f \leq 4\text{Hz}$ (図-6(1)参照)

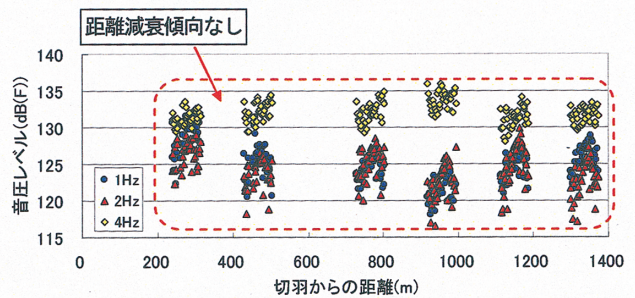
トンネル縦断方向の音圧レベルはほぼ一定であり、距離減衰の傾向が認められない周波数帯域である。したがって、切羽に最も近いP1で測定した音圧データを用いて、総火薬量、周波数と音圧レベルの相関性を分析する。

b) 周波数帯域 $4\text{Hz} < f < 80\text{Hz}$ (図-6(2)参照)

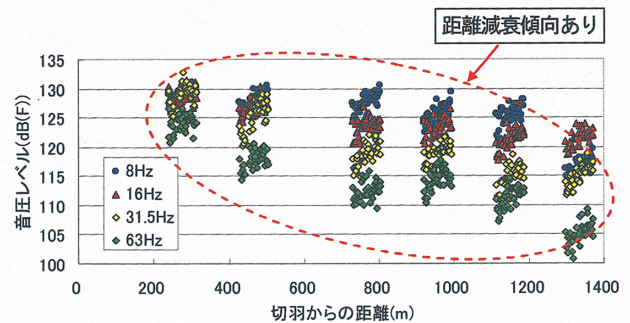
坑内距離に対して音圧レベルに減衰傾向が認められる周波数帯域である。したがって、総火薬量とトンネル坑内距離および周波数との相関性を分析する。

c) 周波数帯域 $80\text{Hz} \leq f$ (図-6(3)参照)

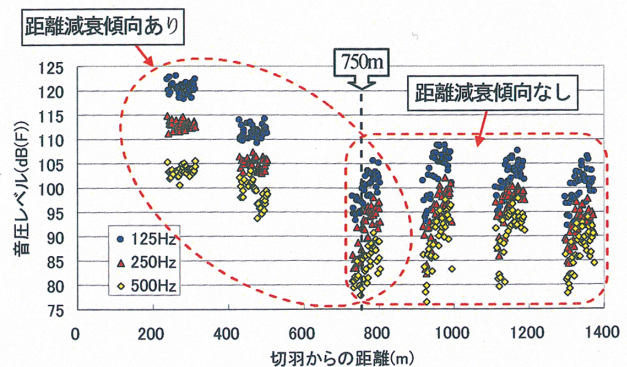
P3マイク設置位置付近の、切羽から750m程度までは、音圧レベルに坑内距離減衰傾向が認められるが、それ以上の距離では、ほぼ一定の音圧レベルが維持されている。



(1) 周波数帯域 $f \leq 4\text{Hz}$



(2) 周波数帯域 $4\text{Hz} < f < 80\text{Hz}$



(3) 周波数帯域 $80\text{Hz} \leq f$

図-6 音圧レベル減衰周波数特性

よって、750mまでは、総火薬量とトンネル坑内距離および周波数との相関性を分析し、750m以上の音圧レベルは一定とする。750mの設定根拠は図-6(3)からの判読のため厳密な位置ではないが、当該周波数帯域は音圧レベルのOA値への寄与度が低いいため、多少の誤差は影響ない。

(2) 音圧スペクトルレベル予測式

前項の検討方針に基づき、特性の異なる周波数帯域ごとに音圧スペクトルレベルの予測式を構築し、表-1に整理した。算出される予測値は等価音圧レベルである。

表中には、本分析における重相関係数Rも合わせて記載した。表から明らかなように、周波数帯域によって相関状況が異なり、周波数が低くなるにつれて重相関係数Rは小さくなる。この表を用いて発破音圧のスペクトルレベルを予測する場合には、この重相関係数Rを参考としながら、必要に応じて余裕を見込むなど、適切な数値を設定する必要がある。

また、本予測式は、収集データに基づく経験式であるため、データ収集範囲内の適用に限られる。つまり、最大使用火薬量の想定位置から、発破音圧スペクトルレベル予測位置までの坑内距離が0.2km～1.4kmの範囲のトンネルへの適用が可能である(図-7参照)。

(3) 他トンネルの施工実績との対比による実用性評価

本研究で提案する発破音の音圧スペクトルレベル予測式の実用性を確認するために、筆者が先の論文¹⁾でSEA法の適用性を検討したAトンネルでの測定結果と対比する。

Aトンネルは、今回の現場計測とほぼ同じ内空断面の2車線道路トンネルであるが、施工者は異なる。含水爆薬とDS雷管を使用しており、総火薬量は77.8kg、切羽からの距離は328mである。

音圧スペクトルレベルの実測値と予測値を対比した結果を図-8に示す。この図からわかるように、予測結果と実測値は概ね一致する傾向を示す。次に、それぞれのOA値を比較すると、Aトンネルの音圧レベルは138dB(F)である。これに対して、表-1に基づいてバンドパスごとの予測音圧レベルを式(4)で合成した値は139dB(F)、式(5)による予測値は138dB(F)であり、いずれもほぼ同じ値となる。これらの結果から、本予測式は十分に実用的であると考えられる。

このように、表-1に示す周波数帯域ごとの予測式を用いることで、総火薬量と切羽からの距離を与えれば、トンネル坑内の任意地点での音圧スペクトルレベルを予測することができる。

ただし、発破音は、切羽の亀裂性状や作業員の技量、発破パターンなど、様々な影響を受けるため、トンネル坑内に生じる音圧レベルは火薬量と坑内距離が同じであっても差が生じることも十分予想される。

表-1 音圧スペクトルレベル予測式

周波数帯域 (Hz)	予測音圧レベル L_c (dB(F))	重相関係数 R
$f \leq 4$	$L_c = 123 + 0.08W - 5.16f - 1.37f^2$	R=0.71
$4 < f < 80$	$L_c = 128 + 0.06W - 0.010D - 0.207f$	R=0.88
$80 \leq f$ (※)	$L_c = 128 + 0.09W - 0.041D - 0.047f$ ($D \leq 750$)	R=0.96
OA	$L_c = 134 + 0.07W - 0.004D$ (式(5)再掲)	R=0.87

※D>750の場合はD=750とする

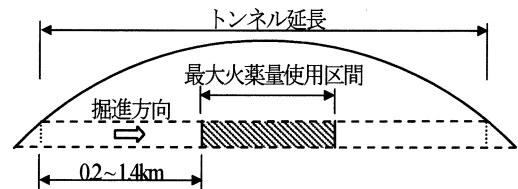


図-7 予測式適用可能トンネル延長の考え方

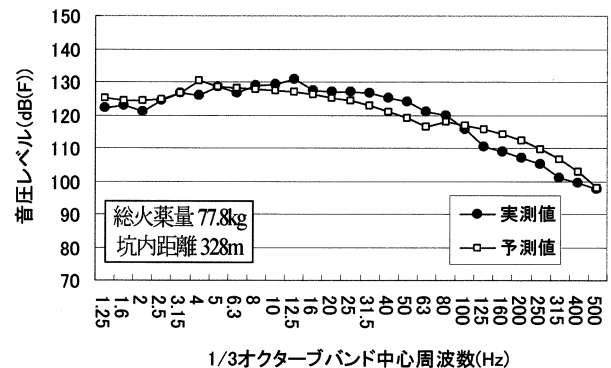


図-8 Aトンネルの実測音圧スペクトルレベルとの比較

6. まとめ

本研究では、トンネル坑内の発破音の距離減衰周波数特性を分析することで、発破音の音圧スペクトルレベル予測式と合成音圧レベル予測式を提案した。

これらの予測式を用いることで、施工前の段階で、トンネル坑内の任意地点における発破音の音圧スペクトルレベルの予測が可能となった。このことにより、SEA法を用いた数値シミュレーションの課題であった施工前での入力値の設定が可能となり、防音扉の音圧低減効果予測解析の一連の流れを計画段階で確立できる。このように、計画段階でSEA法による予測解析ができることによって、防音扉の騒音低減効果の定量的な把握や、施工上の制約によって防音扉に開口部がある場合でも騒音低減効果を予測できる。さらに、音響パワーの伝達経路や周

波数特性の推定解析によって発破音の周波数帯域に着目した防音扉の性能向上策なども検討できるようになる。

また、式(3)に示す従来式では、トンネル坑内では音圧レベルは減衰しないとされているのに対し、本研究により明らかとなったトンネル坑内の音圧減衰の周波数特性では、減衰しにくい音圧レベルが限られた極低周波数帯域であり、切羽から200m程度以上離れると合成音圧レベルは減衰することが確認されている。したがって、従来式による音圧レベルの予測にあたっては、予測式構築根拠の実験条件を踏まえて、トンネル坑内距離によって適用性に注意する必要があることも明確となった。

これに対して、従来式の適用が難しいと考えられる延長のトンネルに対しても、本研究で得た予測式を用いれば、坑口位置での発破音の音圧レベルを予測することができる。このとき、発破音の周波数特性を予測する必要がある場合には音圧スペクトルレベル予測式を用い、そうでない場合は合成音圧レベル予測式を用いるか、もしくは音圧スペクトルレベルを合成して算出するなど、目的によって予測式を使い分ければよい。

このように、本研究で提案する予測式は、SEA法による数値解析を行わない場合でも、施工条件に応じて従来式と使い分けることなどで活用することができる。

本研究で提案した音圧スペクトルレベル予測式は、標準的な2車線道路トンネルの施工現場から音圧データを収集して解析したものであり、一定の汎用性は確保できているものと考えている。しかしながら、雷管種別や爆薬種別、大断面や小断面、検討切羽位置が坑口から1.4km以上離れている場合など、今回の現場計測と異なる条件での検証は十分とは言い難い。また、本研究では、音圧レベルの減衰特性が周波数帯域の違いによって異なるこ

とを経験的に導き出しているが、その理論的検証は今後の検討課題である。

これら課題を踏まえ、今後、さらなる現場計測を行い、データ蓄積と検証、分析を行い、より一層の予測精度の向上と汎用性の拡大、理論的検証などに取り組んでいきたい。

謝辞：本研究にあたって、現場計測に多大なるご協力をいただいた、飛島建設株式会社 筒井隆規氏、小林真人氏、株式会社マイクロサーチ 山下伸一氏をはじめ、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 石田滋樹, 森厚夫, 進士正人: トンネル防音扉の発破音低減解析への統計的エネルギー解析法の適用, 土木学会論文集G, Vol.67, No.1, pp.11-20, 2011.
- 2) Norton, M. P. and Karczub, D. G.: *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge University Press, 2003.
- 3) Lyon, R. H. and Dejong, R. G.: *Theory and Application of Statistical Energy Analysis, Second Edition*, RH Lyon Corp., 1998.
- 4) 環境省: 低周波音の測定方法に関するマニュアル(平成12年10月), 2000.
- 5) 船津弘一郎, 内山恒光: トンネル発破特性と予測, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 1-2-1, pp.57-60, 1987.

(2011.6.6 受付)

PROPOSAL OF PREDICTIVE EQUATIONS FOR THE SOUND PRESSURE SPECTRUM LEVEL OF THE BLAST NOISE IN THE TUNNEL

Shigeki ISHIDA, Hiroya KAKIGI and Masato SHINJI

The noise reduction effect of a sound insulation door installed in a tunnel under construction can be analyzed practically by the numerical analysis using the SEA method. However there was a problem that the prediction analysis is quite difficult at the planning stage because there was not the predictive technique of the sound pressure spectrum level (SPSL) of blast noise to be necessary as input data. In this study, we analyzed relationship between gunpowder quantity and frequency domain damping characteristic of the sound pressure level in the tunnel based on field measurement results. And based on this analysis, we propose a predictive equation for the SPSL of the blast noise in the tunnel, and discuss its applicability.