

統計的エネルギー解析法を用いたトンネル防音扉の発破音低減効果予測手法

中電技術コンサルタント株式会社 正会員 石田 滋樹
 有限会社エヌブイソリューションズ 非会員 森 厚夫
 山口大学大学院理工学研究科 学生会員 柿木 寛也
 山口大学大学院理工学研究科 正会員 進士 正人

1. はじめに

トンネル工事における発破音対策は、空気振動の伝達経路であるトンネル空間内に防音扉を設置し、その音響透過損失によって騒音を低減する方法が主流である。しかし、その騒音低減効果を予測する数値解析手法は未だ確立されていない。本研究は、防音扉を設置したトンネルの発破音に対する音響数値解析法として、統計的エネルギー解析法(Statistical Energy Analysis Method, 以下“SEA法”と略称する)に着目し、現場実験によって得たトンネル内の発破音の音響特性と解析結果との対比によって、その実用性を検証するとともに、予測解析に必要な発破音圧スペクトルレベル予測式を構築して防音扉の数値解析手法の確立を目的としている。数値解析によるシミュレーションが可能となることで、現場での試行錯誤の省略による時間とコストの大幅な縮減や、新しい騒音低減技術開発への利用などが期待できる。

2. 数値解析手法

防音扉の音響透過は、発破による音響パワーが防音扉を励振して反対側の音響空間に伝搬する音響振動連成問題である。解析対象が有限空間となるトンネルでは有限要素法(FEM)が解析手法の適用候補として挙がるが、周波数帯域においてモードの増大とモデルの細密化による計算負荷が指数的に増大するため実用的な解析手法ではない。このような問題を解決する手法に、航空宇宙分野で開発されたSEA法¹⁾がある。SEA法は、解析対象とする振動系を要素に離散化し、要素間のパワーフローがエネルギー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。図-1に空間2要素、平板2要素の計4要素で構築したトンネル解析のSEAモデルのイメージを示す。このようにモデルが簡素で計算負荷が少ないことが特徴であり、大空間となるトンネルの音響振動連成解析にも適用可能と思われるが、これまでにトンネル解析への適用事例は見当たらない。そこで本研究にてAトンネルの建設現場において防音扉を透過した発破音の音圧スペクトルレベルを実測し、SEA法の解析結果と対比してその適用性を評価する。解析ソフトはVA One 2009(ESI社製)を用いた。図-2に示すとおり周波数特性は概ね再現できている。また実測値と解析値の合成音圧レベル(OA値)は134dBと132dBであり十分に実用的である。風管やベルトコンベアなどの複数の開口部がある当該実験現場の防音扉に対しても適切なモデル化によって実用的な精度で数値シミュレーションができた。CPU 2.93GHz, 3.98GBRAMのノートパソコンでの計算時間は約1分であり、極めて短いといえる。

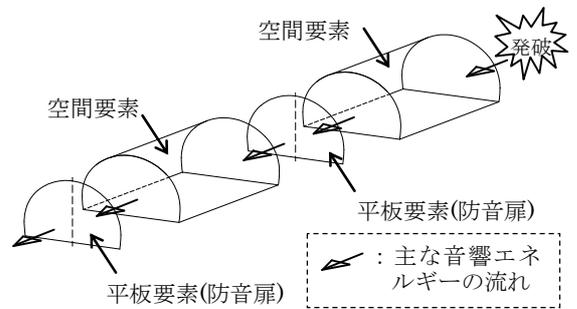


図-1 SEA法によるトンネル解析モデルイメージ

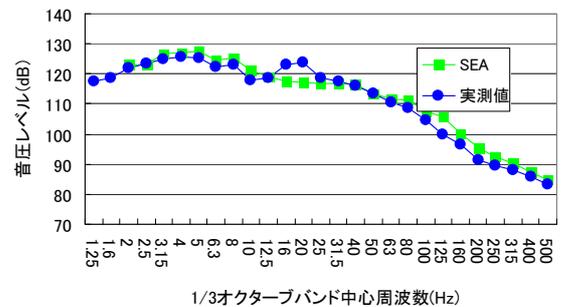


図-2 音圧レベルの実測値とSEA解析との対比

3. 音圧スペクトルレベル予測式の構築

SEA法を用いて防音扉の透過損失を計画段階で予測するためには、入力データとなる発破音の1/3オクターブバンド

キーワード 統計的エネルギー解析法, 音圧スペクトルレベル, 防音扉, 音響振動連成解析

連絡先 〒734-8510 広島市南区出汐2丁目3-30 中電技術コンサルタント株式会社 TEL082-255-5501

音圧スペクトルレベルを用意しなければならない。しかし、現状ではその予測手法がないため、本研究で、Bトンネルの建設現場における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、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の相関性を分析し、予測式の構築に取り組んだ。現場計測では、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-3中、P1~P6)し、計39回の発破音を自動計測した。

発破音のトンネル坑内伝達特性には、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、実測値の音圧スペクトルレベルを周波数帯域ごとに分離して距離減衰傾向を観察し、トンネル坑内の距離減衰特性が、以下のように、3つの周波数帯域で異なることを確認した。

・ $f \leq 4\text{Hz}$

トンネル縦断方向の音圧レベルはほぼ一定であり、距離減衰傾向は認められない。

・ $4\text{Hz} < f < 80\text{Hz}$

音圧レベルに距離減衰傾向が認められる。

・ $80\text{Hz} \leq f$

切羽から750m程度までは音圧レベルに距離減衰傾向が認められるが、それ以上ではほぼ一定となる。

これらの特性に対し、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、距離減衰傾向がない場合には、総火薬量と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抽出し、各周波数帯域ごとの音圧スペクトルレベル予測式として、表-1に整理した。ここで、 L_c :トンネル坑内の音圧レベル(dB)、 W :総火薬量(kg)、 D :坑内距離(m)、算出される予測値は等価音圧レベルである。

この式にAトンネルの施工条件(総火薬量77.8kg、坑内距離328m)を入力した検証解析値と実測値との対比を図-4に示す。周波数特性は概ね一致しており、OA値も実測値138dB、予測値139dBであり、十分に実用的と考えられる。

4. まとめ

本研究では、トンネル発破音の音響解析にSEA法を適用し、実用可能であることを初めて確認した。SEA法では音響パワーの伝達経路を、周波数応答関数に基づく共振系、質量則に基づく非共振系、開口部透過系に分けて把握することができるため、透過音の特徴に応じて効果的な対策を講じることが可能となる。また、火薬量とトンネル内の発破音伝播周波数特性との関係性を分析して、SEA法の入力値となる音圧スペクトルレベルの予測式を構築したことにより、SEA法を用いた数値シミュレーションを施工前に実施することが可能となり、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た。

計画段階で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の防音扉の開口部面積と防音効果の関係の予測や、音響パワーの伝達経路や周波数特性の推定解析による防音扉の性能向上策検討、さらには新たな発想による防音設備の研究など、防音扉の研究開発への活用が期待される。

参考文献

1) Norton, M. P. and Karczub, D. G.: *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*, Cambridge University Press, 2003.

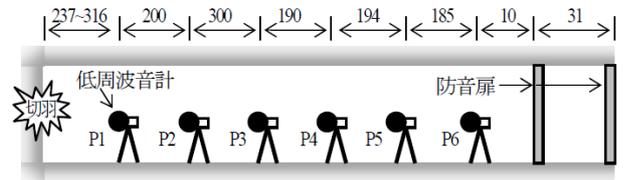


図-3 低周波音計設置位置図(坑内距離 : m)

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)
$f \leq 4$	$L_c = 123 + 0.08W - 5.16f - 1.37f^2$
$4 < f < 80$	$L_c = 128 + 0.06W - 0.010D - 0.207f$
$80 \leq f$	$L_c = 128 + 0.09W - 0.041D - 0.047f$ ($D > 750 : D=750(\text{Const.})$)

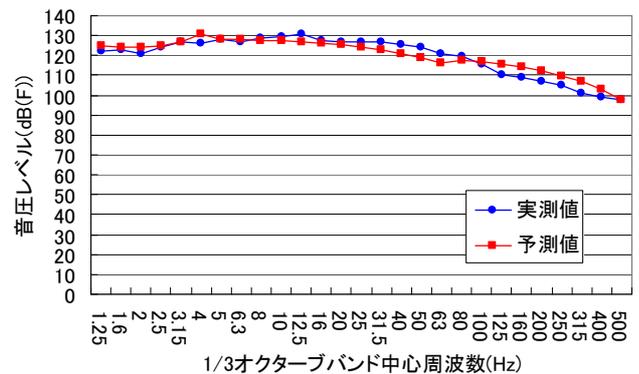


図-4 Aトンネルの実測値と予測値との比較