

統計的エネルギー解析法によるトンネル防音扉の効果予測に関する考察

中電技術コンサルタント株式会社 正会員 石田 滋樹
神奈川大学 正会員 山崎 徹

1. 目的

統計的エネルギー解析法(Statistical Energy Analysis: 以下, SEA)によってトンネル防音扉の設置効果を実用的に予測した既往の研究¹⁾では, 防音扉の開口空間部の音響モード密度に応じた解析精度向上を目的として, 構造体部を SEA 要素, 開口空間部を FEM 要素としたハイブリッド解析を用いた. しかし, このハイブリッド解析では計算負荷が大きくなることや, 解析可能な市販ソフトに限られること, プログラム開発も煩雑となるなどの課題があった. 本報告では, 防音扉を 2 枚設置したトンネル現場の発破音測定結果に対して, SEA 要素だけで構成したモデルによる解析(以下, 解析 SEA)による実用性を評価するとともに, パラメータスタディによる防音扉の透過損失特性について考察する.

2. SEA モデリング

2.1 SEA SEA では音響構造対象系を音場と構造の二種の要素 (Subsystem)の集合体と考え, 要素間のパワー平衡式を考える. 図 1 の 2 要素からなる系(System)のパワー平衡式は以下となる.

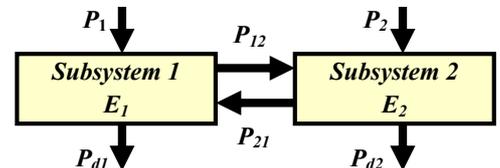


図 1 SEA パワー平衡

$$P_1 = P_{d1} + P_{12} - P_{21}, \quad P_2 = P_{d2} - P_{12} + P_{21} \quad \dots(1),(2)$$

ここで P_i は外部からの入力パワー, P_{di} と P_{ij} は要素内の散逸パワー, 要素間の伝達パワーでそれぞれ以下のように要素エネルギー E_i に比例するものとする.

$$P_{di} = \omega \eta_i E_i, \quad P_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i \quad \dots(3),(4)$$

ここで, ω は角周波数, η_i は内部損失率 (Internal Loss Factor: ILF) で減衰を表し, η_{ij} は結合損失率 (Coupling Loss Factor: CLF) で伝わり易さを表す. SEA では任意入力パワーの下での各要素のエネルギーおよび次式から要素間のパワーフローを把握でき, 系内のエネルギー伝播経路解析や伝達寄与度解析などに有効である.

$$\Pi_{ij} = P_{ij} - P_{ji} = \omega \eta_{ij} E_i - \omega \eta_{ji} E_j \quad \dots(5)$$

なお要素エネルギーは, 音場要素では音圧の二乗, 構造要素は振動速度の二乗に比例したものとして用いる.

2.2 SEA モデル構築²⁾ 防音扉を二枚設置した場合のモデルを示す. 要素構成は, 坑内空間, 扉間空間と外部空間をそれぞれ音場要素, 内扉および外扉をそれぞれ構造要素とする. これらの要素の接続は図 2 のように考える. 構造要素から音場要素への CLF は放射効率 を用いて式(6)より, 音場要素から構造要素への CLF は式(6)と相反定理 ($n_a \eta_{as} = n_s \eta_{sa}$) より算出する. また, 音場要素間の CLF はエネルギー透過率 τ を用いて式(7)より算出する.

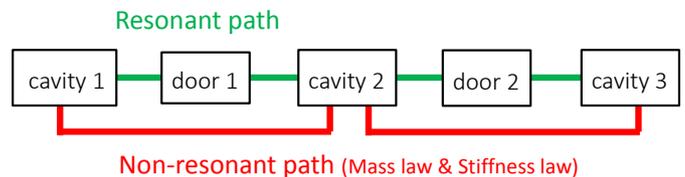


図 2 SEA のエネルギー伝搬経路

$$\eta_{sa} = \frac{\rho c S}{\omega M} \sigma, \quad \eta_{ij} = \frac{c S}{4 \omega V_i} \tau \quad \dots(6),(7)$$

なお ρ は空気密度, c は音速, S と M は扉表面積と質量, V_i は空間体積, n_a と n_s は空間と扉のモード数である.

2.3 エネルギー伝達モデル 以上のように, SEA では音場要素間のエネルギー伝搬を, 扉の共振によるパスと非共振によるパスとしてモデル化する. 非共振パスによる透過損失(透過率)は, 従来から用いられる質量則に基づく式(8)より算出する³⁾. また本来, 高周波数域の解析手法である SEA では前例はないが, 本報では超低周波音域で活用される剛性則による透過損失(透過率)の式(9)を用いる³⁾. K は等価剛性である.

$$TL_{mass} = 20 \log_{10}(Mf) - 20 \log_{10}(\rho c / \pi), \quad TL_{stiff} = 20 \log_{10}(K/f) - 20 \log_{10}(4\pi \rho c) \quad \dots(8),(9)$$

また、防音扉はグラスウールや吹付コンクリートなど様々な要素で構成される。これらの音響透過率については、伝達関数法に基づく音響インピーダンスの算出から透過率を算出する⁴⁾。また既報¹⁾では、風管や排水溝などの扉の開口部を FEM でモデル化した。本報では上述の透過率を開口していない割合を乗じている。

3. 解析 SEA の解析精度検証

解析対象とするトンネルを図 2 に示す計 5 要素系とし、内扉は t=50mm のグラスウールを t=3.2mm 鋼板で挟み込んだ標準タイプの遮音材に t=100mm のコンクリートを吹付けたもの、外扉は t=3.2mm 鋼板に t=450mm のコンクリートを吹付けたものである。

切羽側坑内空間(Cavity 1)で実測した音圧パワーを解析 SEA モデルに与え、扉間空間(Cavity 2)と外部空間(Cavity 3)の音圧レベルを予測した。図 3 は、5 回分の発破実測結果と対比した結果である。Cavity 2 は一部に 10Hz 前後で違いがあるものの概ね 2dB 程度の精度であり、Cavity 3 は 100Hz 以上(発破音では OA に影響しない周波数帯域¹⁾)を除けば 1dB 程度の精度であった。

以上より、解析 SEA によっても、実用的に防音扉設置効果を再現できることを確認した。

4. 防音扉の透過損失特性の考察

防音扉は開口部や可動部があるうえ、異なる素材が組み合わされた複雑な構造のため、式(9)の剛性則における等価剛性 K の的確な算出は困難であることから、扉の等価剛性についてパラメータスタディを行った。図 3 の結果は、扉構造を均一構造と想定した等価剛性を内扉と外扉ともに 0.01 倍としたときのものである。一方、そのままの等価剛性を用いた場合、0.001 倍の等価剛性を用いた場合の結果を図 4 と図 5 にそれぞれ示す。等価剛性の変化は、薄肉構造である内扉では影響が小さく、厚肉構造で剛性が高い外扉では影響が大きくなっていると思われる。

今回設定した、いわゆる見かけの等価剛性は、均一構造で算出したものより 0.01 倍の小さい値とすることで実測値を再現できた。複雑な構造となる防音扉では、構造に基づく等価剛性の算出は困難であり、パラメータスタディや現場実験などによる等価剛性の的確な設定が肝要である。

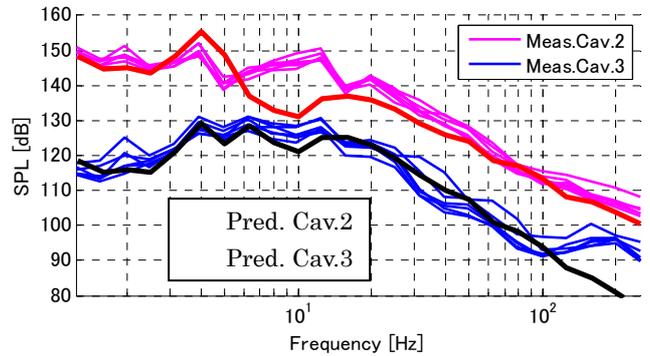


図 3 実測結果と解析 SEA による予測結果の比較 (剛性則の等価剛性を均一構造の 0.01 倍とした場合)

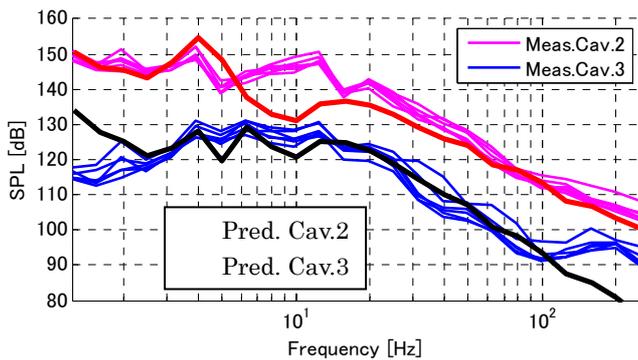


図 4 剛性則の等価剛性を均一構造とした場合

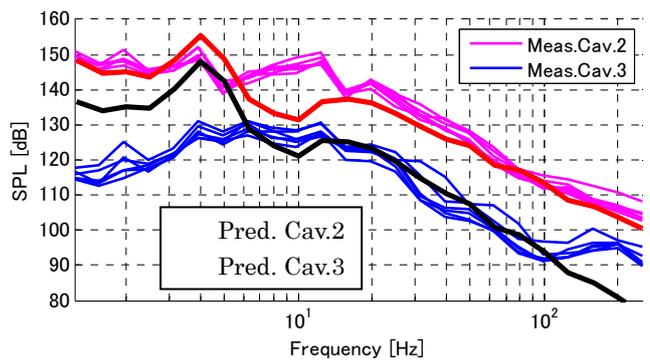


図 5 剛性則の等価剛性を均一構造の 0.001 倍とした場合

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) 山崎徹, 榎本秀喜, 濱本直樹, 宮澤真史, 飯田明由: EV/HEV も含めた車内騒音予測技術と低減技術の開発 ~ 車内空音伝達メカニズムの検討 ~, JSAE SYMPOSIUM「自動車開発を支える最新の空力技術」, No.19-13, pp.14-23, 2014
- 3) 高橋孝, 村上桂一, 青山剛史, 金田英和: 波動ベース法による音響透過解析, 第 40 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2008 論文集, pp.79-84, 2008
- 4) 見坐地一人, 多田寛子, 来原裕司, 野口好洋, 山下剛: 自動車用防音パッケージの SEA パラメータ予測, Honda R&D Technical Review, Vol.15, No.1, pp.181-185, 2003