

風荷重低減型防音板の力学解析と 実用試験品による検証

半坂 征則* 佐藤 大悟*
谷口 望** 間々田 祥吾*

Mechanical Analysis of Soundproof Plate with Function of Wind Load Reduction and Experimental Verification Using Prototype in Practical Scale

Masanori HANSAKA Daigo SATO
Nozomu TANIGUCHI Shogo MAMADA

In order to realize extremely high-soundproof walls without reinforcing a viaduct drastically, we have developed a new type of soundproof plate, which has high soundproof performance in an ordinary state and can reduce a wind load applied on it sufficiently to keep the viaduct to be safe when a strong wind blows. Since the movement of the plate is controlled by magnetic attractive force, we calculated the magnetic attractive force around the plate by a magnetic field analysis. Moreover, we have executed a wind tunnel test and a soundproof property test to verify the mechanism and the property of the plate using a prototype in practical scale.

キーワード：鉄道騒音，防音壁，風荷重，磁場解析，力学解析，大型低騒音風洞実験

1. はじめに

近年，車両の高速化や沿線の高層建築物の増加などに伴い，防音壁を大幅に高くする必要性が増している。防音壁を高くするのに伴って作用する風荷重は増大し，強風時に構造物の設計限界値を上回る可能性がある。そのために，防音壁を大幅に高くする場合は構造物本体の補強を行うなど，既設構造物に対して大規模な工事を行う必要がある。

これに対し，通常時は高い騒音低減性能を持ち，強風時には構造物に対する負荷を大幅に低減するような防音板（以下，風荷重低減型防音板とする）ができれば，この課題を克服できると考えられる。そこで，風荷重低減型防音板の構造を検討し，永久磁石の磁気引力を利用した構造を考案した。この防音板は通常時は閉じていて求められる騒音低減性能を保持し，構造物の設計限界値を超えるような強風時（風荷重 1.5kPa，風速約 35m/s 以上）には開くことにより風による負荷を大幅に低減する。既にこの構造で約 0.3m × 0.3m の模型試験品を試作し，荷重試験および小型風洞での実験により防音板の開閉に関する力学特性を検証している¹⁾。

風荷重低減型防音板は周辺に配置した磁石の磁気引力で開閉を制御する。したがって，防音板の設計に当たっ

ては磁石の磁気引力の予測が必要である。そこで，本稿では新たに，模型試験品で使用した磁石を対象に磁場解析を行い，磁気引力を計算し，模型試験品に対する荷重試験の結果と比較してその精度を検証した。

また，風荷重低減型防音板の実用化を目指して，実用サイズ（約 3m × 1m）の試験品を試作し，鉄道総研の大型低騒音風洞での風荷重試験や音響試験室での遮音性能の測定などを行い，防音板の風荷重低減および遮音の性能を調べた。

2. 風荷重低減型防音板の構造と力学解析

2.1 性能・構造条件

風荷重低減型防音板に求められる性能および構造の条件として次の 4 点が挙げられる。

- ① 防音板の遮音性能は 16dB 以上である
- ② 防音板の風荷重低減性能は 50% 以上（3kPa の風荷重を 1.5kPa に低減）である
- ③ 防音板の奥行は 200mm 以内である
- ④ 設置後，多大なメンテナンスを要しない（目安として構造物の定期検査に併せて安全を確認する程度）

また，鉄道事業者からの要望を考慮して，鉄道沿線への高層建築物にも効果を有する対策として既存 2m 高さの上に 3m の防音板を嵩上げ（既設防音壁の上に防音板を設置して高さを積み増すこと）することを当面の目標

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

特集：材料技術

としている。

①は、文献2)による新幹線騒音予測手法を用いて沿線騒音を計算した結果、将来的に360km/h走行した場合でも防音壁の嵩上げが十分な騒音低減性能(5dB)を得るための条件として求められたものである。

②は、建造物の強度照査を行い、建造物の設計風荷重である3kPaを発生させる強風時でも建造物の安全が保証される条件を求めたものである。

③, ④は鉄道事業者の要望等に基づくものである。

2.2 構造

図1に風荷重低減型防音板の構造を示す。

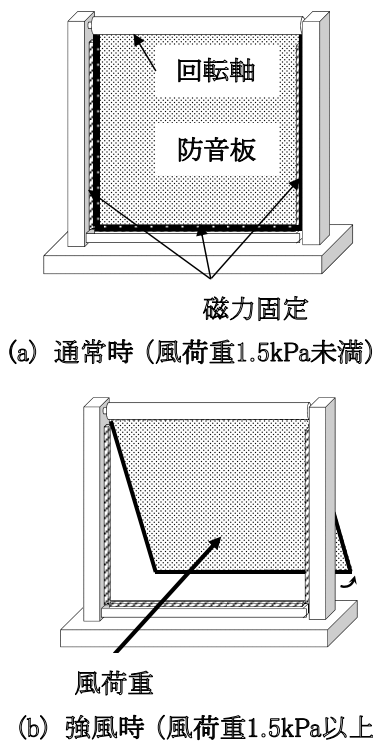


図1 風荷重低減型防音板の基本構造*

*) 図では回転軸以外の3辺を磁力固定した状況を示すが、下辺のみ等一部を磁力固定するのもよい。

防音板の上辺を回転軸で支持し、他の辺のすべて、あるいは一部の辺を永久磁石で固定する。防音板に1.5kPa以上の風荷重が作用すると防音板は回転軸周りに開き、風速が増しても防音板を介して建造物に伝えられる荷重を大幅に低減する。ここで、風荷重とは一様な面分布を持つ風圧を意味し、風速と次式の関係を持つ。

$$p_E = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 \quad (1)$$

ここで、 P_E は一様な面分布な風荷重(Pa)、 C_D は抗力係数(一様平板に対しては2.0)、 ρ は空気密度(約1.23kg/m³)、 v は風速(m/s)である。

式(1)より、1.5kPaは約35m/s、3kPaは約50m/sの

ときの風圧に相当することがわかる。

防音板が開く風速約35m/sの条件下では強風のため車両は停車している。一方、車両通過に伴う風荷重は将来的に速度向上した場合でも1kPa未満であると推定されており³⁾、車両走行時に防音板が開くことはないと考えられる。ただし、本防音板の実用化に当たっては、車両通過時の防音壁嵩上げ部に作用する風荷重のデータをさらに蓄積し、車両走行時に防音板が開かないよう設計の精度向上を図る必要がある。

2.3 力学解析

風荷重低減型防音板の開閉に関する力学について述べる¹⁾。防音板が閉じているときの力のつり合いは図2に示すモデルで表すことができる。まず図2(a)の、風荷重の作用を模擬した一様な面分布荷重モデルについて述べると、防音板に一様に作用する風荷重を p_E (Pa)とし、支持辺AおよびBでの反力の合計をそれぞれ R_A (N)、 R_B (N)とすると、防音板垂直方向の力のつり合いより、次式が与えられる。

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} p_E b l \quad (2)$$

ここで、 b は防音板の幅(m)、 l は防音板の長さ(m)である。

一方、防音板に対して支持辺A(防音板の回転軸と一致する)から x だけ離れた位置に集中荷重 F (N)が作用している場合(図2(b))、回転軸周りの集中荷重 F による回転モーメント $F \times x$ が R_B によるモーメント $R_B l$ と釣り合うことから、 F は p_E と次式の関係を持つ。

$$F = \frac{R_B l}{x} = \frac{p_E b l^2}{2x} \quad (3)$$

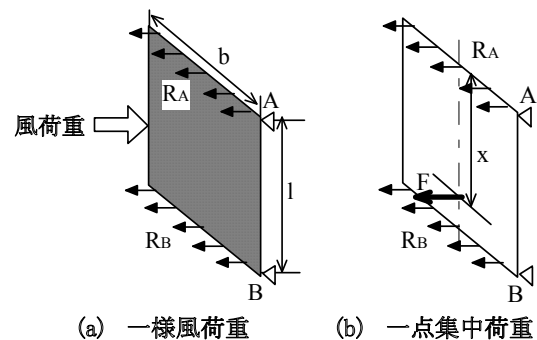


図2 防音板の力のつり合いを表すモデル

3. 磁場解析

風荷重低減型防音板は周辺に配置した磁石の磁気引力で開閉を制御するために、防音板の設計に当たっては磁石の磁気引力の予測が必要である。そこで、新たに、文献1)の模型試験品で使用した磁石を対象に磁場解析を行った。以下にその概要について述べる。

3.1 解析モデルと解析手法

模型試験品について述べると、その基本構造は2.2節の記述に準じるが、防音板は300mm × 300mm × 5mmのフェノール樹脂板を用いた。図3に模型試験品の外観を示す。模型試験品では防音板の回転軸を除く辺の先端に鋼板を取り付け、その下辺に相対する支柱内の磁石固定治具にネオジウム磁石（寸法：17mm × 12.5mm × 5mm、17mm × 12.5mmの面の法線方向の磁気引力：37N）を貼付した。防音板側の磁石と支柱側の磁石は接触させた。防音板の一边につき最大10個までの磁石が設置できるが、その個数を変えて3辺の磁気引力を変化させた。

磁場解析は解析ソフト elfmagic を用いた。図4に解析モデルを示す。

模型試験品で防音板周辺の支柱に配置した磁石と防音

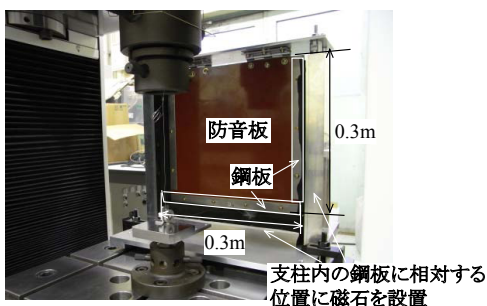
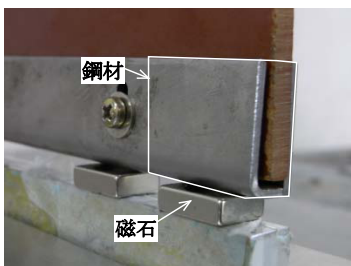
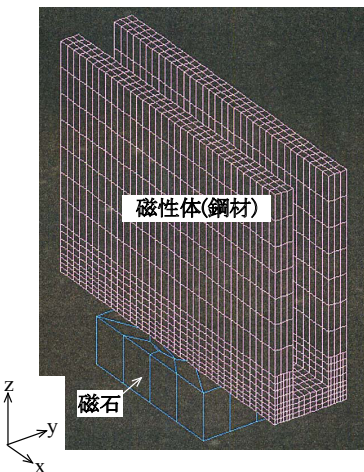


図3 模型試験品の外観



(a) 模型試験品での鋼材と磁石の状況



(b) 解析モデル

図4 試験品の状況と磁場解析モデル

*) 磁石中心と鋼材中心が一致する時の位置を0mmとする。

板先端に取り付けた鋼材をモデル化した。磁石と鋼材間を接触 (z 方向距離 0mm) させ、防音板を回転軸回りに微小変位させた状態を模擬して磁石と鋼材間の y 方向距離を変化させたときに磁石-鋼材間に発生する z (鉛直) 方向および y (せん断) 方向の磁気引力を計算した。

磁場解析では図5に示すような B (磁束密度) - H (磁場の強さ) ヒステリシス特性値を入力する。ネオジウム系磁石の B - H ヒステリシス曲線の概形は既知であり、 B 軸切片である残留磁束密度 B_r と H 軸切片である保持力 H_{bc} を与えれば全ての B - H ヒステリシス特性値が定められる。ネオジウム系磁石の B_r と H_{bc} の値は磁石の供給元の公開値を適用して、 B_r は 1.17T (テスラ)、 H_{bc} は 868kA/m とした。

また、鋼材の B - H ヒステリシス特性については磁石の供給元の情報⁴⁾等を参照に、一般的な値を用いた。

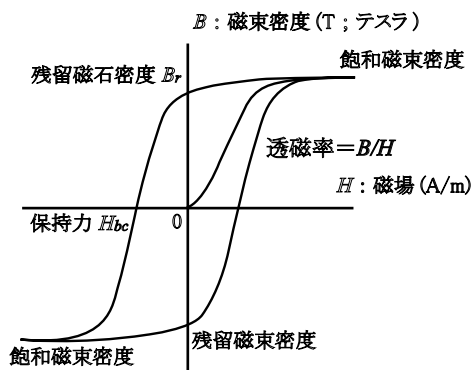


図5 B - H ヒステリシス特性の例

3.2 解析結果

図6に z 方向の磁気引力、図7に y 方向の磁気引力の計算結果を示す。この結果、ネオジウム系磁石と鋼材が接触しているときの z 方向の磁気引力の最大は約 29N であることがわかった。この値はネオジウム系磁石のカタログ値 37N より小さい。カタログ値は磁石と磁性体を全面接触させたときの値であるのに対し、解析結果は磁石と鋼材を y 方向に関して部分接触させたときの値であるためと考えられる。解析結果のカタログ値に対する比率 78% は、本解析での磁石と鋼材の接触面積の磁石上面の全面積に対する比率に概ね近い。

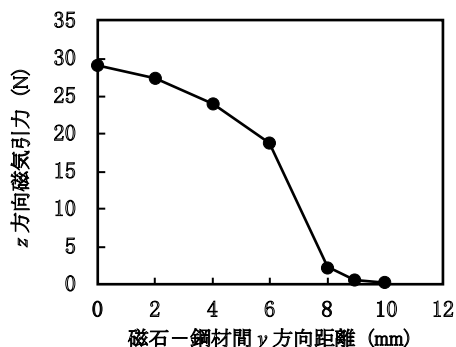


図6 磁石-鋼材間の z 方向の磁気引力の計算結果

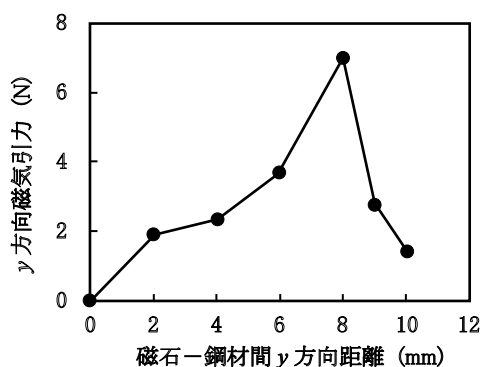


図7 磁石-鋼材間の y 方向の磁気引力の計算結果

y 方向磁気引力の最大値は約 7N となった。この値は式 (2) の p_E に 1.5kPa を代入して得られる反力 R_B を磁石個数 (10 個) で割ったときの値 (約 6.8N) に概ね等しい。これに対して、模型試験品に対する風洞実験により下辺に磁石を 10 個設置したときに防音板が開くときの風荷重は概ね 1.5kPa であることを確認している。

以上から、磁場解析によって風荷重低減型防音板の設計に必要な磁石の磁気引力が概ね予測できた。

4. 実用サイズの試験品による検証試験

風荷重低減型防音板の実用化のためには、防音板が実構造物に適用するサイズでも所定の風荷重 (1.5kPa) で開くことを検証する必要がある。また、防音板が閉じているときには実際に高い遮音性能を示すか確認する必要がある。このため、実用サイズの試験品 (以下、実用試験品とする) に対して荷重試験、大型低騒音風洞による実験および JIS に基づく遮音性能の測定を行った。

4.1 試験品の構造

図 8 に実用試験品の外観を示す。風荷重低減型防音板を用いて実際に設け防音壁を嵩上げする際には、2.96m (線路方向) × 1m (高さ方向) の板を 1 単位として、それを 3 枚積み上げることを想定している。このうち、1 単位を模擬する試験品を試作した。

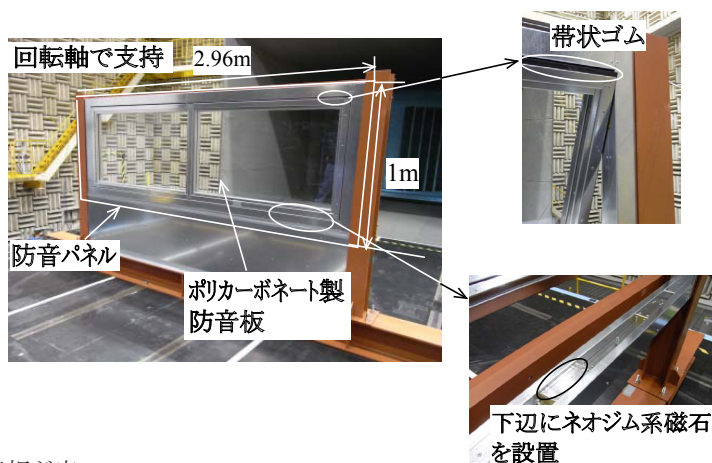
実用試験品は、2 枚の鋼製支柱の間に厚さ 8mm の透明なポリカーボネート (PC) 板と、その外周を覆う鋼製内枠および鋼製外枠からなる防音パネルをはめ込んだ構造とした。防音板と内枠は上辺を回転軸で支持し、その下辺と外枠の相対する箇所にそれぞれネオジム系永久磁石を取付けた。ネオジム系永久磁石は、次の仕様の特注品を防音板下辺および外枠に、2 個 1 組としてそれぞれ 4 組ずつ用いた。

- ・ 幅約 80mm × 奥行約 16mm × 高さ約 10mm, 残留磁

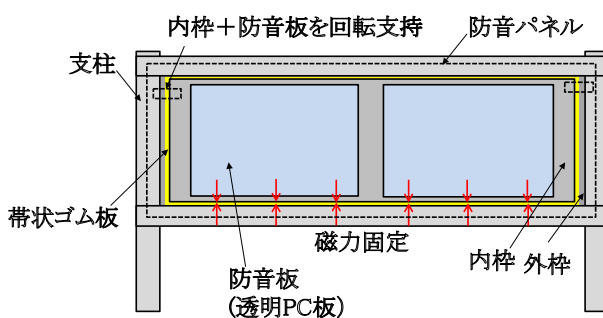
束密度：1.18 ~ 1.25T, 保持力：1026 ~ 1100kA/m
 実用試験品では防音板を回転可能な構造とする一方で防音壁嵩上げに使用できるようにするため、次の 2 点の工夫を行った。

- ①ネオジム系磁石は防音板下辺と外枠の離れた箇所に取付け、防音板の開閉動作に支障しないようにした。
- ②①に伴い防音板下辺では隙間が生じるが、下辺以外の 3 辺も完全に接合されていず、防音板周辺では微少な隙間があると考えられる。このため、隙間からの音漏れを防止する目的で防音板の 4 周辺に帯状のゴムを貼付した。

なお、実用試験品では防音板の下辺と外枠に設置した磁石間の距離により磁気引力を調整する。



(a) 外観



(b) 構造

- ・ 防音板 (透明 PC 板), 内枠および外枠を防音パネルと称する。
- ・ 防音パネルを 2 本の鋼製支柱間に固定する。
- ・ 防音板と内枠を外枠に回転支持し、強風時に両部材が開く。

図 8 実用試験品の外観

4.2 荷重試験

実用試験品に対して、荷重試験により防音板が開くときの集中荷重を測定した。載荷点は幅方向で中央から左右に約 0.44m, 高さ方向で回転軸から 0.74m の位置の

2点（内枠上）とし、それらと材料試験機 AG-300kNIS のロードセルを Y 字形に連結したワイヤロープで結び付けた。材料試験機により防音板を速度約 500mm/min で引っ張り、防音板が開くときの荷重を測定した。

この結果、実用試験品の防音板は、どの磁気引力条件のときでも集中荷重が小さいときは閉じていて、集中荷重が一定以上のとき開くことを確認した。また、防音板が開くときの集中荷重値は、下辺の磁石間距離を小さくして磁気引力を高めるのに伴って増大することがわかった。

式(3)で、風荷重 p_E に 1.5kPa、防音板の幅 b に 2.6m、長さ l に 0.77m、および支持軸一載荷点間距離 x に 0.74m を代入すると、実用試験品では一様風荷重 1.5kPa に相当する集中荷重は約 1.6kN となる。荷重試験により、磁石間距離を調整する（約 5mm にする）ことによって、防音板が開くときの集中荷重値がほぼ 1.6kN となるように設定できることがわかった。

また、実用試験品に対しても磁場解析を行い、磁気引力の磁石間距離依存性を計算した結果、2組の磁石を相対する位置で 5mm 離して固定したとき、その間のせん断方向磁気引力が約 380N であった。したがって、せん断方向磁気引力は試験品全体で約 1.5kN となり、式(2)の p_E に 1.5kPa を適用して求めた下辺反力の値（1.5kN）とほぼ一致している。

4.3 風洞実験

実用試験品で風荷重作用時の防音板の運動を検証するために大型低騒音風洞による実験を行った。

試験品を風洞ノズルより約 3m 離し、風が防音板を含む試験品全体に垂直に当たるよう固定した。風速は、風洞内で軸方向（風を吹き付ける方向）に関してノズル端から約 3m 上流側に設置したピトー管により計測した。

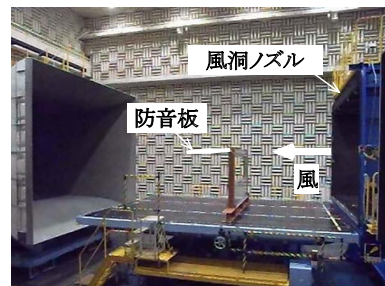
受風に伴い防音パネルに作用する荷重変動を概算的に把握するために、防音パネルとそれを支持する左右の鋼製支柱間に設置したひずみゲージ埋込式ボルトによって防音パネルに対して垂直に作用する風荷重を測定した。

風洞実験の結果、どの磁力条件のときでも防音板は風速が低いときには開かず、一定以上の風速になると開くことを確認した。また、防音板が開くときの風速は磁石間距離を小さくして磁気引力を高めるのに伴って増加し、防音板が概ね風速 35m/s（防音板に対して 1.5kPa が作用する）で開くように設定できることがわかった。

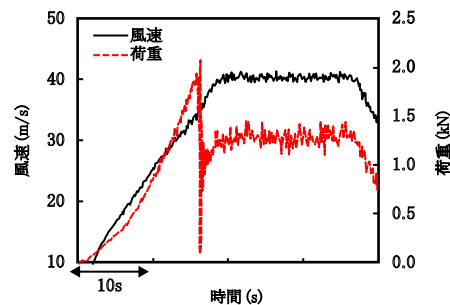
図 9 (a) に風洞実験状況の一例（防音板が開いている状況）を示す。図 9 (b) に風速 35m/s で防音板が開くように設定したときの風速と防音パネルに作用する荷重の合計値の時間変動を示す。防音パネルに作用する荷重は 35m/s 未満のときでは風速の増加に伴って増加するが、風速約 35m/s 付近で大きく減少する。これは、風速約 35m/s のときに防音板が開き、防音パネルに作用す

る荷重が大幅に減少したことを示している。本実験では設備運用上の理由等から風速 40m/s 止まりとしたが、構造物に設計風荷重 3kPa が作用する強風時（50m/s 程度）でも防音パネルに作用する全荷重値を試算（3kPa × 固定部面積 + 3kPa × 回転部の部材面積 × $\sin\theta$ 、 θ は防音板と垂直軸との間の角度で、回転部の自重と風荷重のつりあい等を考慮して 85° とする）した結果、2.1kN と、閾値荷重 4.5kN（1.5kPa × 防音パネル全面積約 3m²）以下となることを推定している。

また、風洞実験では試験品近傍の風速は風洞内のピトー管による計測値と若干異なると考えられる。今後、本防音板の実用化に際しては、試験品近傍での風速も測定する。



(a) 実験状況（風速35m/s以上）



(b) 風速と防音パネルに対する水平荷重

図 9 大型低騒音風洞による風洞実験の結果

4.4 遮音性能の測定

実用試験品に対して、防音板が閉じているときの遮音性能を測定した。本測定では、実用試験品（図 8 参照）の中で防音パネル（防音板+内枠+外枠、標準条件では内枠と外枠間に帯状ゴムを貼付）を試験体とした。

実用試験品では防音板周辺の内枠と外枠間の隙間を埋めるため帯状ゴムを貼付したが、それが防音パネルの遮音性能にどれだけの影響を与えるかを評価する必要がある。そこで、実用試験品の防音パネルについて、標準固定条件（前節の風洞実験において風速約 35m/s で防音板と内枠が開いた条件）の遮音性能を測定するとともに、内枠と外枠間の 4 周辺すべての隙間に対して帯状ゴムの上から粘土で埋めたとき、および現在防音壁の嵩上げに使われている厚さ 8mm の PC 単板を試験体としたときの遮音性能を測定し、これらの性能比較を行った。

測定方法は以下のとおりである。遮音性能の指標であ

る音響透過損失を JIS A 1441-1: 2007 (音響インテンシテ法による建築物及び建築部材の空気遮音性能の測定方法) に基づき測定した。測定は図 10 に示すように残響室 (音源側) と無響室 (受音側) からなる実験室で行った。残響室と無響室間には開口部 (約 $3.6 \times 2.4\text{m}$) が設けられており、そこに試験体 (防音パネルあるいは PC 単板) を取り付けた。開口部と試験体との間の空間は遮音板と粘土で埋めた。その状態で残響室内に設置したスピーカによりピンクノイズを発生させたときの残響室の音圧 (5 点) をマイクロフォン type4165 および type4190 (B&K (株) 製) により、無響室側の試験体に垂直な方向の音響インテンシテレベルをインテンシテマイク type4197 (B&K (株) 製) によりそれぞれ測定した。測定値に基づき音源室と受音室の平均音圧をそれぞれ算出し、両者のレベル差より音響透過損失を求めた。

図 11 に音響透過損失の測定結果を示す。防音板を標準条件で固定しているときの防音パネルの音響透過損失は、測定した全周波数帯域で開発目標値として設定した 16dB 以上の値を示した。

防音板を標準条件で固定しているときの防音パネルの音響透過損失は、周辺を粘土で埋めた場合と比較して測定した全ての周波数帯域で差異が小さい。また、標準固定条件での防音パネルの音響透過損失は、ほとんどの周波数帯域で厚さ 8mm の PC 板並みかそれ以上の値を示している。

以上の結果より、実用試験品で防音板外周の内枠周辺からの音漏れの影響は実用的には無視できる程度と考えられる。

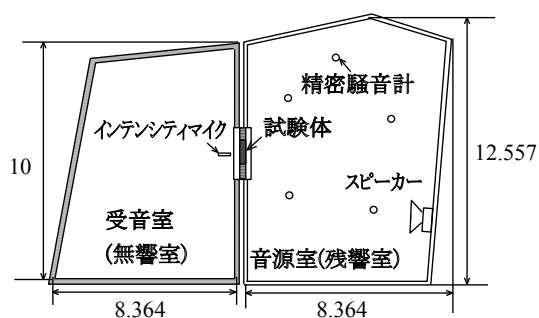


図 10 遮音性能測定用実験室の概略図 (寸法単位: m)

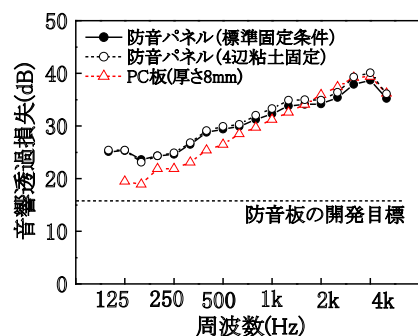


図 11 防音パネルと PC 板の音響透過損失

5. 結論

構造物を大規模に補強することなく防音壁を大幅に高くできるようにするために風荷重低減型防音板の開発を進め、防音板の設計に必要な磁場解析および実用サイズの試験品による検証試験を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 模型試験品で用いたネオジム系永久磁石に対して磁場解析によって磁気引力の値を求めた結果、最大せん断磁気引力は約 7N であることが求められた。この値は模型試験品に対する荷重試験での実測値から推定した磁気引力の値とほぼ等しかった。
- (2) $3\text{m} \times 1\text{m}$ の実用サイズの試験品 (実用試験品) を試作し、荷重試験を行って、実用試験品の防音板でも一様面分布風荷重 1.5kPa 相当の集中荷重作用時に開くようにできることを確認した。
- (3) 実用試験品に対して大型低騒音風洞による風洞実験を行って、実用試験品の防音板についても 1.5kPa 相当の風荷重作用時に開くようにできることを確認した。
- (4) 実用試験品に対して遮音性能試験を行った結果、防音板が閉じているときの遮音性能は、現在防音壁の高上げに使われている厚さ 8mm のポリカーボネート板並みかそれ以上の値を持つことがわかった。

以上から、風荷重低減型防音板の基本形は開発できた。ただし、同防音板を実構造物に適用するためには、長期間屋外で使用するための耐久性および信頼性を評価することや、防音板が風で開いたときに発生する可能性があるフラッター現象について検討する必要がある、などの課題がある。今後、それらの課題について取り組んでいくこととしたい。

謝辞

風荷重低減型防音板の開発には(株)日本板硝子環境アミニティの協力を得た。末筆ながら謝意を表す。

文献

- 1) 佐藤大悟, 半坂征則, 谷口望, 間々田祥吾: 風圧緩和防音工の構造と動作メカニズム, 鉄道総研報告, Vol. 25, No.11, pp.23-28, 2011
- 2) 長倉清, 善田康雄: 新幹線沿線騒音予測手法, 鉄道総研報告, Vol. 14, No.9, pp.5-10, 2000
- 3) 齋藤聡, 秋山保行, 杉本一朗: 高速化に伴う防音壁アンカーの疲労に関する一考察, 第 60 回土木学会年次学術講演会, 2005
- 4) ネオマグ(株)ホームページ: <http://www.neomag.jp/>