

風圧緩和防音工の構造と動作メカニズム

佐藤 大悟* 半坂 征則*
谷口 望** 間々田 祥吾*

Analysis of Mechanism of Wind Load Reduction of the Developed Soundproof System

Daigo SATO Masanori HANSAKA
Nozomu TANIGUCHI Shogo MAMADA

With respect to railway viaducts, raising a noise barrier has been desired to reduce the wayside noise. However, the higher the noise barrier is, the greater the load and moment by wind becomes, and it is hardly possible to install a very high noise barrier without reinforcing the viaduct drastically. Therefore we have developed a new type of soundproof system. In the developed system, the sides of soundproof panel are held by a magnetic attracting force, and the panel is fixed. Accordingly it has a high soundproof ability in the ordinary state, however, when the wind load amounts to a limit of keeping safety of the viaduct, the panel is opened and the wind load is reduced sufficiently.

キーワード：鉄道騒音，防音壁，嵩上げ，風圧，風圧緩和，ネオジウム系永久磁石

1. はじめに

コンクリート高架橋などの鉄道の構造物では多くの区間で防音壁が設置されているが、近年、沿線騒音に対する低減効果を高めることや沿線の高階の建築物における騒音を低減するなどの理由から、防音壁をより高くすることへのニーズが増大している。これに対して、従来より既設の防音壁上に防音板を設置して防音壁を高くする（この防音工を嵩上げという）ことが行われている。さらなる騒音低減のために防音壁の高さをさらに積み増しすることが求められているが、その場合、後述の風に関わる課題が生じる。

風が吹くと防音壁に対して風圧（“風荷重”と呼ぶこともある）が加わり、その負荷は既設防音壁を介して構造物本体に伝えられる。既存の構造物では少なくとも3kPa（風速約49m/s相当）の風圧に耐えるように設計されているが、それは防音壁の高さをこれまでの実績の範囲から大幅に超えないことを前提にしたものである。防音壁を高くするに伴い風圧によるモーメントは増大し、既設防音壁と構造物を補強せずに防音壁を高く（標準的な構造物を対象に試算した結果ではレール頭頂面から3.5m以上）した場合には、強風時に風圧が構造物の設計限界値を上回る可能性がある。したがって、これまでは防音壁の高さを制限するか、あるいは、防音壁を大幅に嵩上げするために、既設防音壁をすべて高強度なものに建造し

直すことや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。

この課題に対し、通常時には高い騒音低減性能を持ち、構造物の設計限界値を超えるような強風時には構造物に対する負荷を大幅に低減する防音工（以下、風圧緩和防音工とする）ができれば、構造物に対して大規模な補強工事をすることなく防音壁を大幅に嵩上げすることができると考えられる。本報では風圧緩和防音工を実現する構造を検討し、防音板の上辺を回転軸で支持し、他の3辺を永久磁石により磁力固定した構造を考案した。この構造体は、防音板は通常時には閉じており、要求さ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（風圧1.5kPa・風速約35m/s以上）には開いて風による負荷を大幅に低減する特徴を持つ。

以下に、風圧緩和防音工の開発経緯を述べ、風圧緩和機構の動作メカニズムとその機構を検証するために行った荷重試験と風洞試験について報告する。

2. 風圧緩和防音工の設計方針

2.1 風圧緩和防音工の基本条件

風圧緩和防音工に要求される主な性能および構造上の条件として、以下のことが挙げられる。

- ① 所定の騒音低減性能を有する。
- ② 所定の風圧緩和性能を有する。
- ③ 防音工の奥行として、既設防音壁の厚さを大幅に超えない（目安として200mm以内）。

* 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：環境技術

- ④ 防音工の線路方向の長さについては、3m程度を施工単位とする。
- ⑤ 防音工の高さは、既設防音壁を含めて5m程度（レールレベル上）を当面の目標とする。
- ⑥ 設置後、多大なメンテナンスを要しない（労力の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）。

①, ②は本防音工における基本的な性能で、それぞれの具体的な目標値については後述する。③～⑥は鉄道事業者の要望等を勘案して設定した条件である。④は、現用の嵩上げ防音工では約3m間隔で支柱を設置し、その間にユニットパネルをはめ込む例が多いことを参考にした目安である。また、⑤は、構造物上に既存の高いものとして、鉄道車両の最大高さを目安として定めた防音工の高さに関する当面の目標値である。

2.2 騒音低減性能

次に、本防音工に要求される騒音低減性能について考察する。風圧緩和防音工による騒音低減のメカニズムは、実質的には既存の嵩上げ防音壁と同様と考えられる。防音壁による騒音低減効果は、主に、図1に示す騒音伝播モデルによって説明される。既設防音壁の高さを2m（レール頭頂面基準）とし、既設防音壁を回折して受音点に伝わる騒音レベルを L_{pa} （行路A）、嵩上げ高さを3mとし、嵩上げた防音壁を回折して受音点に伝わる騒音レベルを L_{pb} （行路B）とする。行路Aによる騒音は、嵩上げ部を通過する騒音の量と行路Bによる騒音の量のパワー和と等価で、次式で与えられる。

$$10^{L_{pa}/10} = 10^{L_{pb}/10} + 10^{L_{pc}/10} \quad (1)$$

ここで、 L_{pc} は嵩上げ部を通過する騒音のレベル値（dB）である。

嵩上げ部が完全な防音体であれば、受音点レベルは L_{pb} であり、嵩上げしないときの受音点レベルは L_{pa} である。

今、嵩上げ部に風圧緩和防音工を適用することを考える。後述のように、当初風圧緩和防音工に対して通風型防音板の適用を考えたが、その場合、防音板は音も通すため通常材料より遮音性能（一般に音響透過損失レベ

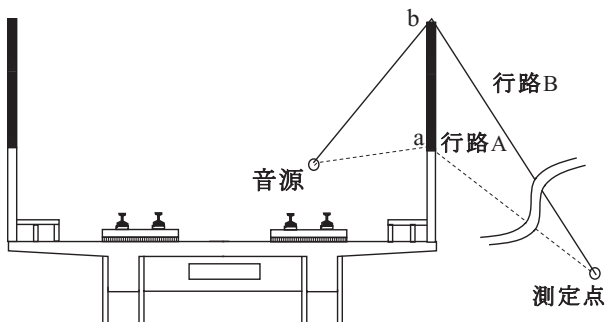


図1 構造物における騒音伝播モデル

ル TL で表す)が低下する。このため、防音壁を回折して伝わる騒音の大きさもそれを考慮する必要がある。遮音性能 TL の材料で嵩上げたときの受音点騒音レベルを L_p とすると、その騒音量は行路Bによる騒音（レベル値 L_{pb} ）と嵩上げ部を通過する騒音量のパワー和からなると考え、次式が成り立つ。

$$10^{L_p/10} = 10^{L_{pb}/10} + 10^{(L_{pc}-TL)/10} \quad (2)$$

既設の高さ2mの防音壁から遮音性能 TL の材料で3m嵩上げたことによる騒音低減量を ΔL とすると、 ΔL は次式で与えられる。

$$\Delta L = L_{pa} - L_p \quad (3)$$

鉄道総研では防音壁の騒音低減効果も含めて沿線騒音を予測する方法を提案¹⁾しており、同法により L_{pa} および L_{pb} を予測することができる。これらを式(1)、(2)に用いて L_p を求め、これと L_{pa} の値を式(3)に適用することにより ΔL を計算することができる。

これまでの防音壁嵩上げの実績や新幹線沿線騒音の現状^{1), 2)}などを考慮すれば、防音壁嵩上げを有効な騒音対策とするには、構造物中心から25m離れおよび地上高さ1.2mの受音点で、嵩上げたことによる騒音低減量 ΔL が少なくとも5dB以上であることが求められる。嵩上げ部の遮音性能 TL について様々な値を仮定したうえで、上述の新幹線騒音予測手法を用いて構造物中心から25m離れ点における騒音低減量 ΔL を求めた。図2に TL と ΔL の関係を示す。この計算では車両速度について高速区間における将来的な速度向上も見越して360km/hとした。これより、 ΔL が5dB以上であるのは TL が15～16dB以上であることがわかる。この結果に基づき、風圧緩和防音工の騒音低減性能に関わる防音板の遮音性能の目標値を16dBと設定した。

2.3 風圧緩和性能

本防音工の風圧緩和性能について考察する。高さ2m（レール頭頂面基準）の既設防音壁の上に高さ3m×線路方向長さ3mのユニットパネルによる風圧緩和防音工を

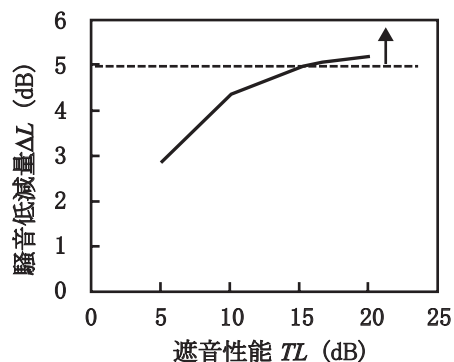


図2 材料の遮音性能 TL と騒音低減量 ΔL の関係

設置することを想定し、風圧作用時の構造物の強度照査を行った。その結果、防音工に作用する風圧を構造物における設計風圧3kPaに相当する強風時でも1.5kPa以下に制限すれば、既設防音壁のユニットパネル取付部や構造物本体に支障を与えないことが試算された。したがって、風圧緩和性能の目標値として、3kPaの風圧を1.5kPaに低減（風圧を50%低減）することと定めた。

3. 風圧緩和防音工の構造

3.1 既存材料の調査

前述の要求性能を満たす防音工を実現する材料と構造を検討する。既存材料の中で風圧緩和防音工に適用できるものはないか調査した。通風機能を有する消音器類がその候補と考えられる。通風機能を有する代表的な消音器として、ルーバー型がある。ルーバー型は複数の細板（ブレード）を1面に配列した防音壁で、一般に、通風や調光のためにブレード間には開口部が設けられている。過去には風圧緩和と騒音低減性能の両立を目的としたルーバー型の研究事例³⁾もある。しかし、ルーバー型防音壁では風圧緩和性能を高めるには開口率を増大させる必要があるが、その場合、壁の騒音低減（遮音）性能は低下する。逆に、壁の騒音低減性能を高めるには開口率を小さくする必要があるが、その場合には風圧緩和性能が低下するなど、壁の風圧緩和性能と遮音性能の向上は矛盾する課題となっている。文献(3)では、奥行220mmのルーバー型防音壁について、風圧を40%低減することが可能な構造のときの騒音低減性能は10dB未満であるとしている。

このように、調査した範囲ではルーバー型防音壁をはじめ開口部を有する消音器類について風圧緩和性能と騒音低減性能がともに優れることを示した例は見当たらず、開口部を有する消音器類は風圧緩和防音工に適用できないと判断される。

この他、防音板の開閉を機械的に制御することによって、通常時には閉じて、所定の風圧が作用すると開く機構の構造体（以下、機械型とする）の開発も進められている。機械型は騒音低減性能と風圧緩和性能に関しては任意に設計できる。しかし、既存の機械型は、全体の部品点数が多く、風圧に連動した機構が複雑かつ大規模で、奥行寸法の制限200mm以内を満足することは困難である。また、構造物における定期検査周期の2年より大幅に短い期間（1年以内）で定期的に保守することが必要な構造ともなっている。

3.2 新構造の考案

調査の結果、既存の材料の中で風圧緩和防音工に適用可能なものは見出せず、新たな風圧緩和防音工の構造を考案した。図3にその構造を示す。考案した風圧緩和防

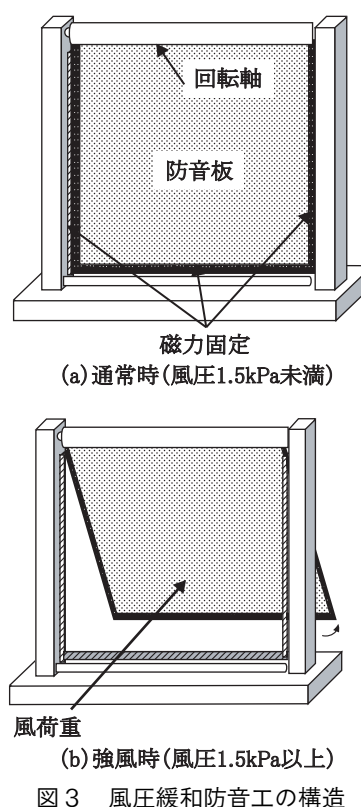


図3 風圧緩和防音工の構造

音工は防音板と支柱（アルミ製）から構成される。防音板の上辺は回転軸で支持し、他の3辺は永久磁石で固定する。防音板に1.5kPa（風速約35m/s）以上の風圧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が直接風圧を受け止めなくなり、構造体に対する風による負荷は小さい範囲に抑制される。力学計算の結果、構造物の設計風荷重3kPa相当の強風時でも防音板および支柱に作用する風による全荷重は、 $1.5\text{kPa} \times$ （防音板と支柱における全受圧面積）以下となることを確認した。

なお、防音板が開く風速約35m/sの条件下では車両に対して運転規制がかけられている。一方、車両通過に伴う風圧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⁴⁾、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、本防音工の実用化に当たっては、車両走行時の防音壁嵩上げ部に作用する風圧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。

防音板には車窓からの景観確保や沿線の日照確保等の理由から、実用的には現用の防音工と同様に厚さ約8mmの透明ポリカーボネート板を用いる。防音板の下辺および左右辺の端面には1mm程度の薄い鋼板を貼付する。防音板の下辺と左右辺には相対する支持枠の中に設置したアルミ製柱状体（磁石固定治具）の防音板側の面に小型の磁石を複数貼付し、防音板の端面と磁力吸着させる。

考案した防音工は磁石を用いた単純な構造であるため、既設防音壁上に容易に設置できると考える。また、既存

特集：環境技術

の機械型防音工のように、煩雑なメンテナンスの必要はないと考えられる。

4. 荷重試験による検証

4.1 集中荷重モデルによる荷重閾値の推定

風圧緩和防音工の防音板には実構造物ではほぼ一様な風圧が作用すると考えられるが、防音板はこれに伴う回転軸まわりのモーメントにより開く。これに加え、防音板として一様な材料を扱っていることなどを考慮すると、風圧緩和防音工の防音板の開閉機構を解析する方法として、防音板に実際に風を当てるだけでなく、防音板に一様な風圧が作用したと等価な、回転軸回りのモーメントが等しい一点集中荷重に置き換えて検討することが考えられる。本章では風圧緩和防音工の防音板の開閉機構に関する一点集中荷重による解析および実験について考察する。

解析については、一様風圧、集中荷重ともに防音板の法線方向に作用すること、および集中荷重が回転軸方向に関して防音板の中央位置に作用するなどの仮定をおけば、防音板が閉じているときの力のつり合いは図4で示すモデルで表すことができる。図4 (a) は風圧の作用を表す等分布荷重モデル、図4 (b) はそれと等価な一点集中荷重モデルである。両モデルともに支持点Aは回転軸に相当し、支持点Bは下辺磁石固定部に相当する。なお、後述する実験では左右辺に磁石を設置した条件についても検証を行っているが、解析では防音板が開き始める時の力学条件に関しては下辺の磁力吸着力の影響が支配的になるとの仮定のもと、下辺のみ磁石を設置したモデルで検討を行った。

まず、図4 (a) の等分布荷重モデルについて考える。防音板に一様に作用する風圧を p (Pa) とし、支持点AおよびBでの反力をそれぞれ R_A , R_B (ともにN) とすると、鉛直方向の力のつり合いより、次式が与えられる。

$$R_A = R_B = \frac{1}{2} pbl \quad (4)$$

ここで、 l ははりの長さ (=防音板の鉛直方向長さ, m) である。

このときの風圧 p による回転軸まわりのモーメント M_Q (N・m) は R_B による回転モーメントとつり合っていることを考慮すると、次式が成り立つ。

$$M_Q = R_B l = \frac{1}{2} pbl^2 \quad (5)$$

一方、はりに対して支持点A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、集中荷重による回転軸まわりの回転モーメント M_F (N・m) は載荷点ー回転軸間距離を x とし、 $F \times x$ で与えられる。

M_Q と M_F が釣り合うときの条件から、次式が与えられる。

$$F = \frac{M_Q}{x} = \frac{pbl^2}{2x} \quad (6)$$

この式は防音板に作用する風圧とそれと等価な集中荷重との関係を示している。式(6)の p に風圧閾値 1.5kPa, b, l, x に後述する試験品における寸法値 ($b=l=300\text{mm}$, $x=290\text{mm}$) を適用すると、集中荷重における閾値約 62N が推定される。

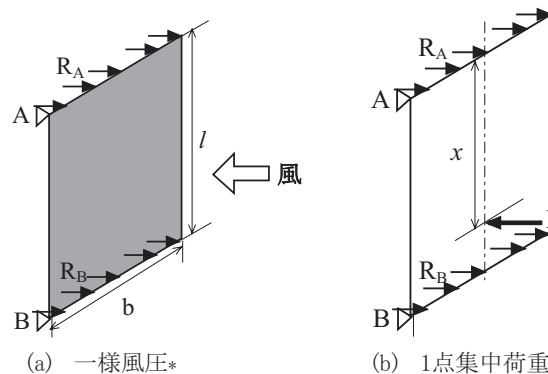


図4 防音板の力のつり合いを表すモデル

*) (a) の網掛けは一様風圧が作用していることを示す。

4.2 試験方法

風圧緩和防音工に対する一点集中荷重試験について述べる。試験品は前述の構造体を用いるが、防音板は、約 300mm × 300mm × 4mm のフェノール樹脂板を用いた。支持枠内の磁石固定治具には法線方向の磁力が 37.7N (カタログ値) のネオジウム磁石 (17 × 12 × 5mm) を貼付した。磁石固定部では一辺につき最大 10個までの磁石が設置できるが、その個数を変えて3辺の磁力吸着力を変化させたときの防音板開放時の荷重との関係を測定した。

載荷点は防音板の回転軸方向に関して中央、鉛直方向に関して回転軸から約 290mm の位置とした。荷重は材料試験機 AG-IS (島津製作所(株)製) を用いて加えた。試験状況を図5に示す。

このとき、試験速度は、突風の実測例⁵⁾ を参考に、突風による風圧の立ち上がり速度として約 15N/s (荷重試験と同じ作用点での集中荷重への換算値) とし、試験品における荷重速度条件がそれとほぼ同等となる 500mm/min とした。

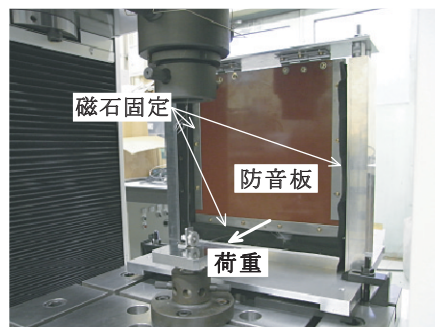


図5 荷重試験の状況

4.3 試験結果

試験の結果、どの磁石配置条件のときでも荷重が一定の大きくなるまで防音板は開かず、荷重が一定の大きさ以上になると開くことが確認された。図6に磁石の配置条件と防音板が開いたときの荷重の関係を示す。

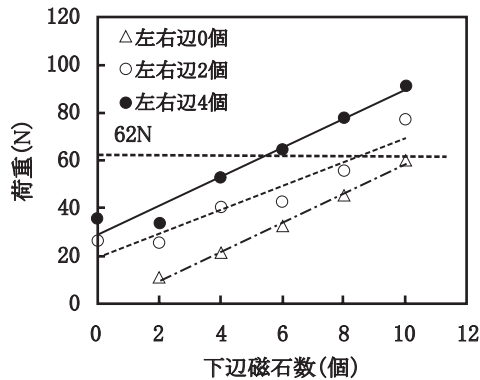


図6 荷重試験結果*

*) 左右辺には同数の磁石を配置している。

この結果をまとめると次のとおりである。

- ① 下辺、左右辺とも防音板開放時の荷重は磁石数の増加に伴って線形的に増加した。
- ② 下辺6個・左右辺4個、下辺8個・左右辺2個、下辺10個・左右辺0個の磁石配置の時、1.5kPaの風圧に概ね相当する荷重で防音板が開いた。

磁石数の増加に伴い防音板開放時の荷重は増加し、3辺の磁力吸着力を調整して防音板が開くときの荷重を設定できることがわかり、1.5kPaの風圧に相当する荷重値で防音板が開く磁石配置条件を見出すことができた。

5. 風洞試験による検証

5.1 風洞試験の概要

考案した風圧緩和と防音工について、一様に風圧が作用した際の防音板の開閉動作を検証するため、小型風洞(開放型)による風洞試験を行った。風洞試験の方法は次のとおりである。試験品は前章と同じものを用いた。試験品を風洞ノズルより約1m離し、風が防音板を含む試験品全体に垂直に当たるよう試験品を固定した。磁石の配置条件についても前章の荷重試験と同様とした。風速を0m/sから約36m/sまで徐々に変化させたときの防音板の開閉状況を観察するとともに、防音板が開いたときにはそのときの風速を記録した。図7に風洞試験の状況(防音板開放時)を示す。

5.2 風速と風圧の関係

ここで、防音板に吹き付けられる風の風速と風圧との関係について考察する。一様な定常風による風圧 p は次式で与えられる⁶⁾。

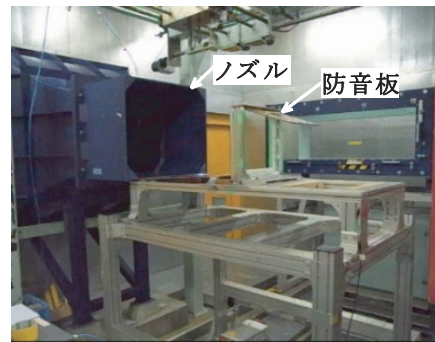


図7 風洞試験の状況—防音板開放時—

$$p = \frac{1}{2} \rho c v^2 \quad (7)$$

ここで、 c は抗力係数($c = 2.0$)、 ρ は空気密度(約 1.23kg/m^3)、 v は風速(m/s)である。

式(7)より、1.5kPaは約35m/s、3kPaは約49m/sのときの風圧に相当することがわかる。

式(7)は概算式であり、風圧の精度検証のために、風洞試験において防音板に作用する荷重を実測した。ただし、防音板に一様に作用する風圧を正確に測定することは難しいため、ここでも前章で述べた一様風圧と等価な一点集中荷重の考え方にに基づき、風による荷重の測定を行った。試験品において、下・左右辺とも磁力固定せずに防音板が回転自由な状態で、防音板の受風面の裏側で、回転軸方向に中央で回転軸から200mm位置(風洞試験における固定治具の事情等から載荷点を前章の荷重試験と異なる位置とした)でロードセルDB-100N(㈱昭和測器製)を用いて荷重を測定した。

荷重測定値は、前章で導出した一様風圧と等価な一点集中荷重を求める式(6)に式(7)を代入して得られる次式に基づき算出される荷重計算値と比較した。

$$F = \frac{bl^2 \rho c v^2}{4x} \quad (8)$$

5.3 試験結果

図8に、防音板の上部回転軸から200mmの点に対して作用する集中荷重について、ロードセルによる測定値(黒点)と、式(8)による計算値(実線)を示す。この結果、測定値は計算値とほぼ一致した。この結果は、前章で導いた一様風圧と等価な一点集中荷重を求める力学モデルが妥当であることを示しており、今後、風圧緩和と防音工を実用化するに当たって、3辺の磁力吸着力などのパラメータについて、一点集中荷重の解析や測定に基づき概算的な設計ができることを示している。

表1に、磁石個数と防音板の開放時の風速の関係を示す。表中一印は風速約36m/s時でも防音板が開かなかったことを示す。

試験の結果、どの磁石配置条件でも風が弱いときには

特集：環境技術

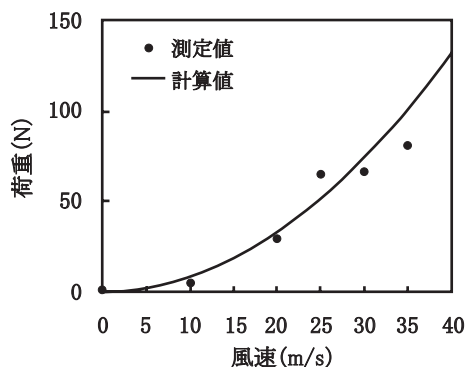


図8 風洞試験における風圧

表1 防音板開放時の風速 (m/s)

		左右辺磁石数 (個)		
		0	2	4
下辺磁石数 (個)	2	18.0	24.6	26.7
	4	24.4	30.0	32.5
	6	28.9	33.5	34.6
	8	32.5	34.9	—
	10	35.0	—	—

防音板が閉じたままであることが確認された。また、一部の条件を除き風速が一定以上になると防音板が開くことが確認された。そして、下辺6個・左右辺4個、下辺8個・左右辺2個、下辺10個・左右辺0個のとき、1.5kPa相当の約35m/sに近い風速で防音板が開いた。この1.5kPa相当の風で防音板が開くときの磁石配置条件は、前章の荷重試験において閾値荷重約62Nで防音板が開くときの条件と一致している。このように3辺の磁力吸着力を調整して所定の風圧(1.5kPa)で防音板が開くようにできることを確認した。

6. まとめ

騒音低減効果の向上などのために防音壁のさらなる嵩上げが求められているが、構造物を大規模に補強することなく防音壁の大幅な嵩上げを可能にすることを目的として、風圧緩和防音工の検討を行った。その結果、以下

の知見を得た。

- ①防音板の上辺を回転軸で支持し、下辺および左右辺を磁力固定した構造からなる風圧緩和防音工を考案した。これは防音板が通常時には閉じて高い騒音低減性能を有する一方で、構造物の設計限界値を上回ることが懸念される強風時(風圧1.5kPa・風速約35m/s以上)に開き、構造物への負荷を低減するものである。
 - ②簡単な力学モデルによる検討の結果、防音板に一樣に作用する風圧と力学的な等価な一点集中荷重を求める方法を見出した。
 - ③一点集中荷重による荷重試験の結果、上記モデルにより推定した1.5kPaの一樣風圧と等価な集中荷重値のとき防音板が開くように3辺の磁力吸着力を調整できることを見出した。
 - ④風洞試験の結果、試験品の防音板は無風あるいは微風時には閉じていて、風圧が一定以上のとき開くことを確認した。そして、3辺の磁力吸着力を調整することによって、防音板が1.5kPa相当の風圧作用時に開くようにできることを見出した。
- 今後、本研究で得られた知見をベースに、実用的な風圧緩和防音工の開発に取り組むこととしたい。

文献

- 1) 善田康雄：鉄道騒音の発生源と低減対策，騒音制御，Vol.19, No.3, pp.41-44, 1995
- 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) 渡辺義則，吉田勇，久保喜延，加藤九州男：風の抵抗の低減を考慮した防音壁の基礎的研究，土木学会論文集，No.530, pp.117-122, 1996
- 4) 齋藤聡，秋山保行，杉本一郎：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
- 5) 本間真，薄達哉，花田淳也，前田潤滋，大森睦：鉄塔支持型煙突における鉄塔構成部材の動的風応答，第18回風工学シンポジウム論文集，pp.479-484, 2004
- 6) 豊倉富太郎，亀本喬司：流体力学，実教出版，p.335, 1990