

風荷重低減型防音工の復元機構の開発と耐久性評価

半坂 征則* 佐藤 大悟* 間々田 祥吾*
木山 雅和** 谷口 望***

Development of Device to Return to the Original Position the Soundproof Plate Possessing a Function of Wind Load Reduction and Evaluation its Durability

Masanori HANSAKA Daigo SATO Shogo MAMADA
Masakazu KIYAMA Nozomu TANIGUCHI

In order to install a sufficiently high soundproof wall without reinforcing the viaduct drastically, we have developed a new type of soundproof system. This system is mainly composed of a soundproof plate supported by a rotary axis and fixed by a strong magnetic attractive force, and the plate can be opened when strong wind blows. In this system, the plate needs also to be returned to the original position soon after the wind becomes weak. Therefore a device to return the soundproof plate has been developed. Moreover the durability of this system which is necessary for this system to be used practically has been evaluated.

キーワード：鉄道騒音，防音壁，風荷重，力学解析，大型低騒音風洞，磁力

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大している。ところが、防音壁を高くする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、新たに風荷重低減型防音工の開発を行った¹⁾。この防音工は図1に示すように、回転自由な軸によって支持された防音板とそれを支持する枠からなり、防音板の回転軸以外の辺を磁石の磁気吸引力によって固定する。したがって、通常時では防音板は閉じていて必要な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（目安として風圧 1.5kPa、風速約 35m/s 以上）には風荷重が磁石の磁気吸引力を超えて防音板が開き、これに伴い風による負荷を大幅に低減する。これまで大型低騒音風洞における風洞実験や遮音性能試験等により本防音工の基本的性能を確認してきた²⁾。一方で、この防音工の実用化のためには、次のことを改良または検証する必要があると考えられた。

- ① 風が弱まり列車の運行が再開されるまでに防音板を元の位置に戻すための機構を備える。
- ② 風洞だけでなく、自然の条件下でも防音板は強風時に開き、風が弱まったら元に戻ることを確認する。
- ③ 屋外の沿線で長期間使用できる耐久性を有するか

* 材料技術研究部 防振材料研究室
** 日本板硝子環境アメニティ株式会社
*** 前橋工科大学 社会環境工学科

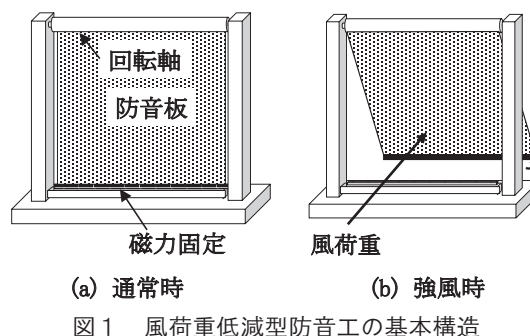


図1 風荷重低減型防音工の基本構造

検証する。

①について、これまで本防音工では防音板の自重以外に防音板を元に戻す機構を導入していないため、風が弱まって列車運行が再開されても防音板が元に戻らないことも起こり得ることが懸念された。そこで、風が弱まったら防音板を速やかに元に戻す機構（以下、復元機構と称する）の検討を行った。また、②について台風多通過地域の屋外で暴露試験を行い、実際の自然風に対して防音板の開閉運動を確認した。そして、③について防音工の耐久性を評価した。以下にそれらの結果について報告する。

2. 防音板の復元機構の開発

2.1 復元機構の要求性能

本防音工の復元機構に求められる性能・構造条件として、以下のことが考えられる。

- ① 構造および機構が複雑で大規模なものとならず、施工および保守が簡便であることとする。

- ② 理想的な目標として一定風速 25m/s の条件下でも防音板を復元させることとするが、現実的な目標として 15m/s の受風時に防音板を復元させることとする。
 - ③ 設計風荷重 3kPa 相当（目安として 50m/s）の風が吹いているときでも防音工全体に作用する荷重が 1.5kPa × 受風面積以下となるように防音板は十分な開放角度で開くものとする。
- ②について、この機構の目的は列車運行が再開されるまでに防音板を復元させることを考慮すると、最も厳しい理想目標として 25m/s の受風時でも防音板を復元させることが想定される。なぜなら、標準的な規則では列車運転の規制解除の条件として、25m/s 以下の風が 30 分間保持されることを規定しているからである。ただし、図 2 に示すように一般的には自然風は大きな変動を示し、30 分間の時間間隔を考慮すると、25m/s を大幅に下回る瞬間が少なからず存在するものと考えられる。過去の調査結果³⁾を参考にすると、防音板は 15m/s 程度の風条件の下で復元させることができれば、通常、列車の運転規制が解除される前には防音板が閉じている状態が得られると考えられる。
- ③は構造物の安全を保持するために本防音工に課せられた条件であるが、これは復元機構の性能にも関連する。なぜなら、防音板を復元させるためには板の回転軸において風荷重以上のモーメントを与える必要があるが、それは同時に防音板を開きにくくする方向にも作用する。このため、防音板に過度の復元力を与えると防音板が所定の角度まで開かないおそれが生じる。

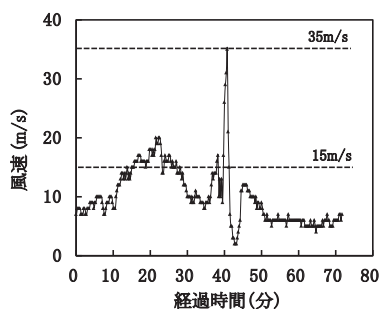


図 2 強風発生事例³⁾

2.2 防音板の開閉に関する力学条件

以下に、復元機構の開発に必要な防音板の開閉に関する力学条件を考察する。

まず、流体力学より、防音工に一様面分布風圧が作用するときの風速と風圧の関係は次式で与えられる。

$$p_c = \frac{1}{2} \rho_a C_D v^2 \quad (1)$$

ここに、 p_c は一様面分布風圧 (Pa)、 C_D は抗力係数、 ρ_a は空気密度 (約 1.23kg/m³)、 v は風速 (m/s) である。

防音壁などの半無限の一様平板とみなせる構造物に対

しては C_D は約 2 と想定される。その場合には 1.5kPa は約 35m/s、3kPa は約 50m/s のときの風圧と求められる。

一方、受風時に本防音工に作用する荷重 F_w (N) は次式で与えられる。

$$F_w = p S_F + p S_R \cos \theta \quad (2)$$

ここに、 S_F は固定部（外枠や支柱）の受風面積 (m²)、 S_R は可動部である防音板の受風面積 (m²)、 θ は防音板開放角 (°) である。

本防音工において風圧および受風荷重に関する許容限界値をそれぞれ p_L (Pa)、 F_L (N) とすると、両者は次式の関係を持つ。

$$F_L = p_L \times S_A = p_L \times (S_F + S_R) \quad (3)$$

ここで S_A は本防音工における開放角 0° のときの全受風面積 (m²) である。

本防音工では p_L を 1.5kPa と想定している。また、現用の防音壁嵩上げ工の状況を参照するとともに鉄道事業者からの要望に基づき、当面は約 3m 間隔で支柱を設置し、その間に約 3 × 1m² のサイズを 1 ユニットとする防音パネル（防音板と支持枠）を 3 枚はめ込む工法を想定している。したがって、1 ユニットでの F_L は式 (3) より約 4.5kN と想定される。設計風荷重 3kPa (p_D とする) 相当の風が吹いているときでも構造物への負荷が設計限界を超えないためには、 F_w は F_L 以下に抑える必要がある。式 (2) より、 θ は次式の θ_L 以上となる必要がある。

$$\theta \geq \theta_L = \cos^{-1} \left(\frac{F_L - p_D S_F}{p_D S_R} \right) \quad (4)$$

文献 2) では上述の考え方に基づく実用寸法の試験品で試験を行っているが、この試験品の寸法仕様で計算すると、 θ_L は約 70° と求められる。

次に、防音板が強風で開くときに防音板に作用する風荷重について考える。防音板は一旦開いた後では、風による負荷と防音板の自重や防音板に与えた復元機構によるモーメントなどつりあいを保ちつつ運動し、風が強まると防音板はより大きく開く。各瞬間に防音板に作用する負荷を厳密に求めるには、その瞬間ごとのつり合いの式を求めてそれを解く必要があり、それは難しい作業となる。しかしながら、復元機構の開発に必要な知見としては、すべての瞬間において防音板に作用する風圧が満たすべき許容限度値 $p(\theta)$ (Pa) を求めることであり、その値は式 (2) を考慮すると、次式で与えられる。

$$p(\theta) = \frac{F_L}{S_F + S_R \cos \theta} \quad (5)$$

即ち、防音板が開いているときでは θ がどんな値を

とつても防音板ユニットに作用する風による総荷重は F_L 以下となるべきであり、その条件から各 θ における p の取り得る許容限度値が式 (5) で与えられる。

一方、風により防音板に作用するモーメントは次の2式で求められる。

$$W_{or} = \frac{1}{2} p(\theta) \cdot b \cdot \cos\theta \cdot |\ell_A^2 - \ell_B^2| \quad (6)$$

$$W_{cr} = \frac{1}{2} p_c \cdot b \cdot \cos\theta \cdot |\ell_A^2 - \ell_B^2| \quad (7)$$

ここに、 W_{or} は防音板を開ける方向に作用する風のモーメント (N・m)、 W_{cr} は防音板を閉じる方向に作用する風のモーメント (N・m)、 b は防音板幅 (m)、 ℓ_A は防音板回転軸一下端間距離 (m)、 ℓ_B は防音板回転軸一上端間距離 (m) である。通常は防音板自重も復元力に加えられるように、 $\ell_A > \ell_B$ とする。

式 (6) の $p(\theta)$ は式 (5) により与える。また、式 (7) の p_c は式 (1) に目標風速 (15 または 25m/s) を適用して求めた値を適用する。

防音板に導入する復元機構によるモーメントについては、式 (6) による W_{or} 、および式 (7) による W_{cr} とのつり合いの条件から性能目標値を定める。即ち、防音板が開くときの復元機構によるモーメントは W_{or} 以下とし、防音板を復元させる (閉じさせる) ためのモーメントは W_{cr} 以上とする必要がある。なお、復元機構を導入すると、板が開くときのモーメント (以下、開け力と称する) と閉じる (復元する) ときのモーメント (以下、閉じ力と称する) が異なるケースが少なくない。

2.3 復元機構の設計概要

防音板の復元機構として前節の①の条件を考慮すると、電動機構等は導入し難く、簡単で煩雑な保守の必要がない機構として、建築物のドア等で使用されるドアクローザ (以下、クローザとする) が注目された。ただし、式 (6)、(7) に示すように、本防音工に適用するクローザの特性として、防音板開放角度 θ の増加に伴ってモーメント値が低下することが求められる。市販のクローザにはそのような特性はなく、本防音工用に新たなクローザの開発を行った。

図3に開発したクローザの概念図を示す。クローザはスプリング、ピストンおよびカムスピンドルなどを円柱状筐体に封入した構造からなる。スプリングによって回転軸に開けおよび閉じモーメントが付与されるが、カムスピンドルを介して力を伝達しているために非線形特性が与えられる。トルクレンチ等を用いた実測により、開発品のモーメントは開け、閉じともに θ の増加に伴って低下すること、および θ が 70° 以下の範囲で標準の市販品 640 型 (日本ドアーチェック(株)製) の値を上回っていることなどを確認している。

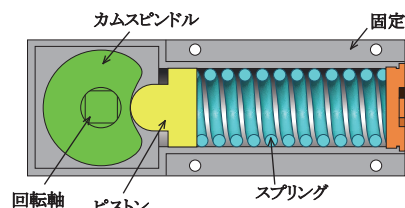


図3 風荷重低減型防音工用クローザ

2.4 復元力低減のための検討

以上のように、クローザにおいて本防音工に適用するための特性改善が得られたが、式 (7) に基づく風によるモーメントとクローザの性能値を比較すると、25m/s の受風下で防音板を戻すことを目指した場合には開発品でも依然としてモーメント値が不足していることが推察された。そこで、風によるモーメント値を低減することが必要であると考えたが、そのための有力な手法のひとつとして防音板軸位置をその中心に近づけることが考えられる。なぜなら、図4に示すように受風時において防音板の回転軸の反対側では負のモーメントが作用し、防音板全体のモーメントは両者を加算したものとなる。このため、防音板の回転軸をその中心に近づけると、防音板全体に作用するモーメントは小さくなる。ただし、その場合には風により防音板を開けるモーメントも同時に小さくなるので、防音板が十分に開くか検証する必要がある。

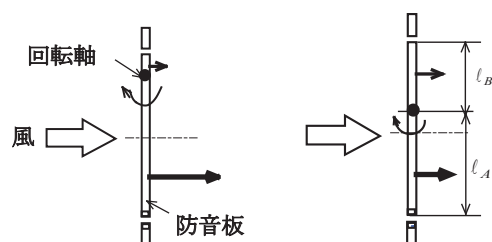
風によるモーメントの低減は防音板を閉じさせる磁石の磁力吸引力も低減させることにもつながるため、磁石の低コスト化にも寄与する。

次式で定義される軸位置率 k_a (%) において、25% (以下、この条件を「軸下」と称する)、50% (「軸中」条件) および約 74% (「軸上」条件) の3条件について検討した。文献2) の試験品では防音板の回転軸位置は軸上条件に近い。

$$k_a = \frac{\ell_A - \ell_B}{\ell} \times 100 = \frac{\ell_A - \ell_B}{\ell_A + \ell_B} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 ℓ は防音板の鉛直方向長さ (m) である。

図5に、風とクローザによるモーメントの比較を示す。



(a) 中心から遠いとき (b) 中心に近いとき

図4 回転軸位置と風によるモーメントの関係

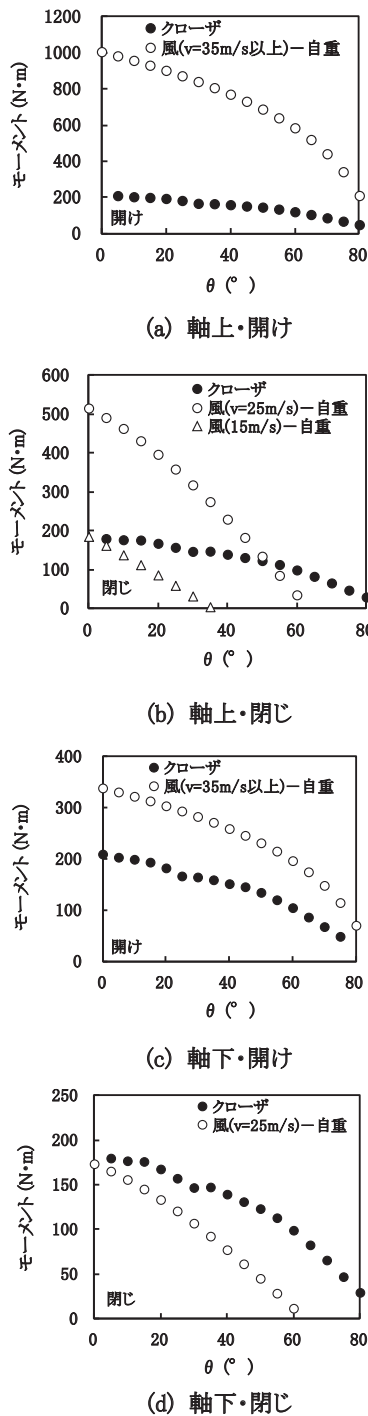


図5 防音板に作用するモーメント

ただし、紙面の都合上軸上および軸下条件の結果を示す。各図において風によるモーメントは開けに関しては式(6)、閉じに関しては式(7)に基づくが、クローザによるモーメントと比較するために、いずれも防音板の自重によるモーメントを差し引いた値を示している。この結果、次のことが認められた。

- ① 風によるモーメントは開け、閉じともに防音板回転軸の位置が下方、即ち板の中心に近づくに伴い低

下する。

- ② 開けに関して、3つの軸位置条件のいずれも所定の角度範囲(70°以下)の全域で風によるモーメントはクローザによるモーメントを上回り、計算上は防音板が開くことが推定される。
- ③ 閉じに関して、軸上条件では15m/sの風によるモーメントに対してはθのほぼ全対象範囲で上回り、計算上この風条件下でも防音板が復元することが推定される。
- ④ 閉じに関して、軸下条件ではクローザによるモーメントは25m/sの風によるモーメントに対してもθのほぼ全対象範囲で上回った。

3. 風洞実験と屋外暴露による検証

3.1 風洞実験による検証

実用寸法の試験品を用いて防音板の受風時の運動を評価するために、大型低騒音風洞(米原風洞)において風洞実験を行った。試験品の構造や寸法および磁石の仕様等は文献(2)の試験品とほぼ同様としたが、防音板の回転軸位置に関して軸上、軸中、軸下の3条件に設定できるようにした。また、試験品の防音板回転軸部にはクローザ開発品を適用した。

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、風洞内に設置した熱線風速計により計測した。

図6に試験状況の例を示す。また、表1に試験結果の一例を示す。この結果、以下の知見を得た。

- ① すべての軸位置条件において約35m/sで防音板が開くように磁力を設定できる。
- ② 防音板の回転軸が下方、即ち、板の中心に近づくほど防音板を保持するために必要な磁力吸引力が低下する。
- ③ 防音板は軸上条件時には約15m/s、軸中条件時には約20m/s、軸下条件時には約25m/sの一定風速下でも復元する。
- ④ 防音板の回転軸が板の中心に近づくほど防音板の最大開放角度は小さくなる。

④に関して、軸下や軸中の条件時には50m/sの風が吹いているときでも防音板開放角は70°に満たなかった。この理由として、計算では防音壁に一様面分布風圧を作用することを仮定したが、実験では試験品はその1ユニットのみを模擬した有限平板に風圧を作用させたなど、計算仮定と実験条件との間に差異があり、それが影響を与えたことなどが考えられた。

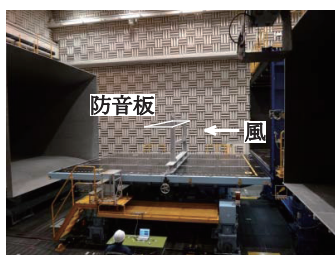
以上のように、軸下条件では風洞実験でも防音板は所定の風速で開きかつ閉じることが確認されたが、強風時に防音板が十分に開くという条件は満足されなかった。

表1 主な風洞実験結果

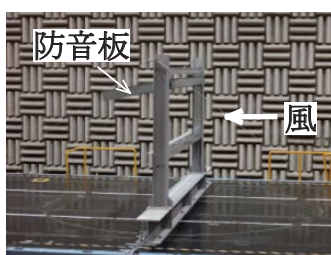
軸位置	磁石			風速 (m/s)		最大開放角 ^{*2} (°)
	組数	磁石間距離 (mm)	吸引力 ^{*1} (kN)	開け	閉じ	
上	4	8	0.57	約35	約15	約77
中	2	7	0.33	約35	約20	約52
下	2	20	0.0	約35	約25	約29

*1) 磁場解析による推定値

*2) 50m/s 受風時の値



(a) 全体



(b) 試験品周辺

図6 風洞実験の状況例

一軸上、35m/sの風で防音板が開いている状況一

このため、本試験結果の範囲では軸下条件を推奨することはし難く、軸上条件を有望な条件と判定する。ただし、防音板を復元させる条件としては15m/sの受風時である。

3.2 屋外暴露による検証

実物寸法の試験品に対して自然風に対する防音板の運動を評価するために、台風多通過地域において暴露試験を行った。試験品の構造・寸法および磁石の仕様などについてはここでも文献2)の試験品に準じるが、クローザに関しては、台風の季節の前に試験品を設置する必要があったなどの理由から、市販品(640型)を適用した。一方、過去の気象データ³⁾を参照すると、暴露箇所でも実際に35m/s以上の風が吹くより35m/s以下の風が吹く確率の方が高いと考えられる。その中で本試験において防音板が実際に開く状況を確認することが求められていたことなどを考慮して、試験品での磁力について、これまでの目標値の35m/sより若干弱い風速で開く条件で設定した。試験品にはビデオカメラと風速計を設置し、台風接近直前にそれらのシステムを動作させ防音板の運動の計測を試行した。

暴露試験の結果、2014年10月において台風19号通過時に約30m/sの風が吹いたとき防音板が開き、風速が10~20m/s程度まで低下すると防音板は復元することを確認した。そして、台風19号通過時に防音板は通算14回開閉を繰り返したことも確認した。

4. 耐久性評価

4.1 耐久性評価項目

本防音工を実用化するために必要な耐久性として、以下が考えられる。

① 沿線での環境劣化因子に対する耐久性

本防音工は強力な磁力吸引力を持つ磁石を用いているが、鉄道沿線では主としてレール/車輪間で発生する鋼粉が磁石に付着し磁石の経年劣化をもたらすおそれがある。また、長期間屋外で使用することに伴い防音板回転軸の固渋なども懸念されるため、これら環境劣化因子に対する耐久性を評価する必要がある。

② 防音板の繰り返し開閉に対する耐久性

本防音工では防音板は強風により開閉するため、繰り返し開閉に対して回転部を中心とした防音板の耐久性を評価する必要がある。

4.2 耐久性評価手法

前節で述べた各項目に対して、次の試験により耐久性を評価した。

①に対して東京近郊の在来線有道床軌道の沿線(近接側レール中央から約2.6mでレールレベル付近の位置)で暴露試験を行った。この箇所とレール間距離は、本防音工の主要な適用箇所として想定している高架橋(在来線、新幹線ともに)の防音壁とレール間距離と同等かそれ以下である。試験品の寸法は暴露箇所の地理的条件等も考慮して0.3m×0.4m×0.09mの模型サイズとした。この試験品を2個暴露している。クローザを設置できる程度の寸法の試験品とすることができなかった一方で、市販のクローザは屋外の長期間の使用に対して実績を有することなどを考慮して、この試験品ではクローザは導入していない。一方で文献2)の仕様相当の磁石を各試験品に1組ずつ使用した。試験品内の磁石周辺の構造・状態については例えば防音板周囲には音漏れ防止や磁石の保護などを目的とした帯状ゴムを貼付するなど、できるだけ実用品を模擬したものにした。

②に関して、大型低騒音風洞実験に用いた試験品に対して風洞実験後防音板の連続開閉試験を行った。ただし、防音板の開閉の瞬間に磁石の磁力やクローザによって大きな荷重が与えられることに着目し、防音板を開閉角5°程度まで連続開閉させる試験を行った。この角度まで防音板を開けば、防音板の開閉荷重が大幅に低下することを実測等により確認している。一方、上述したように市販のクローザでは使用実績等により90°近い連続開閉に対しても良好な耐久性を持つことが確認されている。

防音板の開閉には荷重試験機AG-300KNIS(島津製

特集：環境工学

作所^(株)を用い、試験速度は文献2)の試験に準じて約500mm/minとした。載荷回数は最大 5×10^3 回とした。載荷回数について次のことがいえる。気象庁のデータ³⁾によると東京近郊において過去50年間で35m/s以上の風が吹いた日は8日と記録されている。1日の中の状況については詳細な記録は公表されていないが、仮に前章で述べた台風通過時なみと考えると、50年間で最大で112回と考えられる。最近強風の機会が増加する傾向があることなどを考えても、上記は十分な開閉回数と考えられる。

4.3 耐久性評価結果

4.3.1 環境劣化因子に対する耐久性評価

在来線沿線での暴露試験の結果、これまで約2年間、試験品に破損、歪み、ボルトの緩み、防音板回転軸の固渋などの異常は認められなかった。

試験品の磁石を目視観察したところ、鋼粉の付着等の変化は確認できなかった。その理由として、防音板周囲に貼付した帯状ゴムが鋼粉の防音板-支持枠間への進入を防止していることなどが考えられる。

4.3.2 防音板の繰り返し開閉に対する耐久性評価

連続試験の結果、防音板を 5×10^3 回約 5° まで繰り返し開閉させた後においても、試験品に破損、歪み、ボルト緩み等の異常は認められなかった。

4.4 今後の課題

以上、本防音工について基本的な耐久性は確認できた。その一方で本防音工を実用化するに当たって、依然として次の課題に取り組む必要があると考えられる。

① 環境劣化因子に対する耐久性

鉄道沿線での暴露試験により約2年間の範囲での耐久性は評価できたが、実用に際しては数十年規模の使用に対する耐久性評価が必要と考えられる。実際そのような期間の暴露試験は現実的でないため、これまでの試験結果等に基づき数十年の使用に対する劣化予測も試行する。

② 防音板の繰り返し開閉に対する耐久性評価

防音板の繰り返し開閉に対して、負荷最大である防音板開閉の瞬間に着目した耐久性評価はできた。一方、それ以上の角度への防音板の開閉に関しては①と同様にクローザの使用実績等を参考にしたが、環境劣化因子に対する評価も含めて、開発品自体の耐久性評価も行う必要がある。

5. まとめ

防音壁を大幅に高くできるようにすることを目的とした風荷重低減型防音工について、風が弱まったときに防音板を元に戻す(復元)機構の開発および防音工の耐久性評価を行った。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 防音板に作用する風によるモーメントを低減する方法として、防音板の回転軸を板の中心に近づけることを考案した。
- (2) 施工と保守が簡便な復元機構としてドアクローザに注目し、本防音工用に防音板開放角の増加に伴って板に与える開けおよび閉じモーメント値が低下するクローザを開発した。
- (3) 開発したクローザを導入した試験品に対して大型低騒音風洞で実験を行った結果、防音板の回転軸の位置が板長の74%(板の上方)のときに防音板は所定の風速(35m/s)で開き、一定風速15m/sの条件下でも復元することを確認した。
- (4) 台風多通過地域で暴露試験を行った結果、台風通過時において試験品の防音板は30m/s程度の風が吹いたときに実際に開き、風が弱まると速やかに閉じることを確認した。
- (5) 在来線での暴露試験や防音板の開放する瞬間に着目した連続開閉試験の結果、本防音工が基本的な耐久性を有することを確認した。ただし、本防音工の実用化に当たっては、多面的に本防音工の耐久性を改めて厳しく吟味し、安全性を高める努力を行うこととする。

謝辞

風荷重低減型防音工の開発には、下西製作所株式会社、日本ドアーチェック製造株式会社および沖縄都市モノレール株式会社の協力を得た。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) 佐藤大悟, 半坂征則, 谷口望, 間々田祥吾: 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, 鉄道総研報告, Vol. 26, No.12, pp.17-22, 2012
- 3) 気象庁 HP: <http://www.jma.go.jp/jp/yoho/>