

風荷重低減型防音工の実用性評価

佐藤 大悟* 半坂 征則**
木山 雅和*** 小笹 武史***

Evaluation of Novel Noise Barrier with Hinge Mechanism for Acoustic Performance and Durability

Daigo SATO Masanori HANSAKA
Masakazu KIYAMA Takefumi KOZASA

The authors have proposed a novel noise barrier which can reduce wind load with use of hinge mechanism. It has been confirmed through the acoustic test that the noise barrier satisfies practical noise insulation performance. In order to estimate the applicability of the proposed barrier to the noise reduction, the acoustic analysis in the frequency domains was conducted. Then the numerical results indicated that the analysis is applicable to visualizing the distribution of noise transmitted from the running train. Exposure test in the outdoor environment confirmed that the noise barrier made opening-closing movement during the strong wind like typhoon and indicated enough durability for the natural field use.

キーワード：風荷重低減型防音工，防音壁，遮音，音響透過損失，有限要素法

1. はじめに

鉄道コンクリート高架橋では、沿線での騒音対策のため、従来から防音壁が設置されている。近年では、高層建築物の増加に伴う高所空間や列車の高速化に対応して、より騒音低減性能の高い防音壁が求められ、ポリカーボネート板を用いた透光型遮音板による防音壁の嵩上げが行われている。嵩上げでは、一定程度までは高さの増加とともに騒音低減効果が増加する反面、高さの増加に伴い構造物に作用する風荷重が増加するため、実際の嵩上げは1.5m程度に制限されている。

このような背景の下、著者らは強風時に構造物に作用する風荷重の負荷を低減する機構を有する風荷重低減型防音工を開発した¹⁾。これは、遮音板に回転支持機構を導入し、強風時に遮音板が風下方向に開く可動構造としたもので、既設構造物の大幅な補強を要すること無く既設のコンクリート防音壁上に高さ約3mの嵩上げが可能になることを見込んでいる。

本研究では、風荷重低減型防音工の実用性を評価するため、音響試験によって遮音性能を評価したほか、音響解析によって風荷重低減型防音工設置時の騒音低減効果の予測と、その適用性について検証した。また、鉄道沿線にて施工性および列車走行音に対する遮音性能を評価した。さらに、屋外で長期暴露試験を実施し、台風通過

時の強風による遮音板の開閉動作の検証および長期暴露後の部材等の劣化評価を行った。以下、詳細を報告する。

2. 風荷重低減型防音工の概要

図1に風荷重低減型防音工の外観を示す。風荷重低減型防音工は幅約3m、高さ約1m、奥行約90mmのパネル形状で、既設防音壁に設けた支柱間に設置する。遮音板は厚さ8mmのポリカーボネート板と周囲および中央の補強金属枠で構成される。補強金属枠の側面にはばねによる復元機構を有する回転軸（以下、クローザ軸と称する）を、補強金属枠下部およびそれに相対する外枠に磁石を止め具として設けている。これらの磁石は非接触で吸引し合い、両者間の磁力で1.5kN/m²の風荷重（風速約35m/s時に相当）が作用するまで遮音板は閉じた状態を保持する。しかし、1.5kN/m²を超える風荷重が作用すると風下方向へ開き、受風面積を小さくすることで構造物への負荷を一定以下に抑える。遮音板周囲には可動のため5～10mmの隙間を設けており、柔軟なゴム材によってこの隙間からの音漏れを防止し、十分な遮音性を確保している。

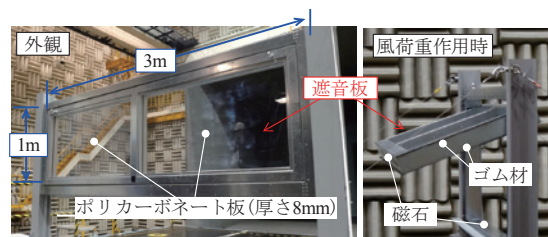


図1 風荷重低減型防音工の構造

* 材料技術研究部 防振材料研究室
** 研究開発推進部 研究戦略
*** 日本板硝子環境アメニティ株式会社

3. 遮音性能の評価

3.1 試験の概要

前章で述べたように、風荷重低減型防音工では遮音板と外枠間にゴム材を導入し、隙間からの音漏れを防止している。本章では、JIS A 1441-1 2007（音響 - 音響インテンシティ法による建築物および建築部材の空気音遮断性能の測定方法 - 第1部：実験室における測定）に基づいて音響透過損失を測定し、遮音性能について評価を行った。

試験は日本板硝子環境アメニティ（株）龍ヶ崎研究所内で実施した。図2に示すような残響室 - 無響室にて実施し、両室間の開口部に試験体を設置した。音源側では、スピーカーからのピンクノイズ発音音を5点のマイクロホンで室内平均音圧レベルとして測定し、受音側ではインテンシティプローブにより音響インテンシティレベルを測定した。得られた音響インテンシティレベルおよび平均音圧レベルより、式(1)によって音響透過損失 TL を算出した。

$$TL = L_p - 10 \log_{10} \left(\frac{\sum 10^{L_{i,j}/10} \cdot S_i}{\sum S_i} \right) - 6 \quad (1)$$

ここで、 L_p は音源室内の平均音圧レベル、 $L_{i,j}$ は i 番目の測定点における音響インテンシティレベル、 S_i は面積である。

なお、風荷重低減型防音工は左右対称なため、測定面は片側半分とし、測定面を格子状に等分割した80点でそれぞれインテンシティプローブを移動させ測定した。図3に試験状況を示す。

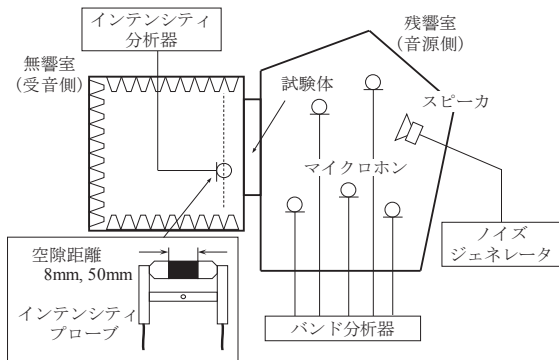


図2 測定系の構成

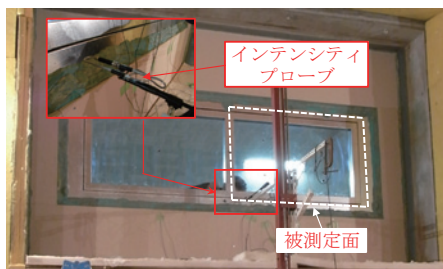


図3 試験状況

3.2 試験結果

図4に、試験の結果得られた音響透過損失を示す。なお、比較のため厚さ8mmのポリカーボネート板の音響透過損失²⁾もあわせて示す。この結果、63Hz以上では20dB以上の音響透過損失を示し、125～2kHzのオクターブバンド音響透過損失平均値は約29dBで、風荷重低減型防音工の開発目標値¹⁾の16dBを上回った。また、隙間からの音漏れによる顕著な音響透過損失の低下は認められず、比較対象であるポリカーボネート板（同平均値27dB）以上の値を示した。これは、測定面に板厚8mmのポリカーボネート板以外に、金属補強枠等が含まれており、この部分の音響インテンシティがポリカーボネート板よりも小さかったためと考えられる。

以上の結果、風荷重低減型防音工は実用上十分な遮音性能を有していると判断された。

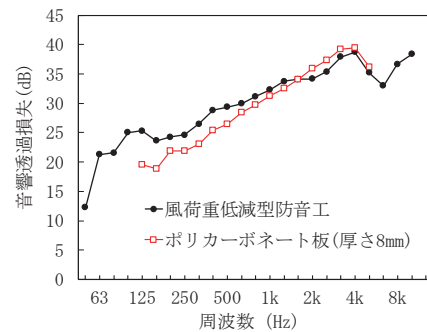


図4 音響透過損失測定結果

4. 音響解析による騒音低減効果の予測評価

4.1 有限要素法による音響解析

防音壁を設置した際の騒音低減効果は、回折波と直接波の行路差を計算し、前川チャート³⁾等を用いて評価される。鉄道においては、列車走行時の音源を4つに分類し、構造物や軌道の条件を考慮した予測手法⁴⁾が活用されている。

一方、防音壁の騒音低減性能は材料の吸音性能に依存するため、吸音の周波数特性を考慮すると、より精度の高い騒音低減効果の予測が可能と考えられる。また、防音壁を嵩上げた場合には、走行に伴う車両からの発生音の遮蔽効果の向上が期待できる一方、防音壁壁面と車体間での音の多重反射の影響や、音源や壁面等の位置関係によって周波数ごとに回折等の音の伝搬特性が異なり、騒音低減効果の予測はより複雑になると考えられる。

そこで、本研究では、数値解析手法によって風荷重低減型防音工を設置した場合の騒音低減効果の評価を実施し、その適用性について検証した。解析では、音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise⁵⁾を用い、有限要素法による3次元波動方程式に基づく周波数領域の音響解

析を実施した。

なお、本解析で得られる結果は定常解となるため、実走行試験時のような時間の変動を考慮した評価結果等との比較方法については別途検討が必要となる。

4.2 解析モデルおよび解析条件

解析では、高架橋上での列車走行を想定し、解析空間を高架橋断面の中央から片側半分とした。図5に解析モデルを示す。解析空間は幅29m、高さ24mとし、床版上面の高さを約12mとした。解析では3次元空間を扱うため、解析モデル全体の厚みを0.02mとした。

解析条件は、風荷重低減型防音工の設置による音の伝搬傾向に与える影響を比較するため、高架橋端部に高さがレールレベル+2mの防音壁のみ存在する条件(条件1)、条件1に対して防音壁上に風荷重低減型防音工を3m嵩上げた条件(条件2)とした。

音源は車両下部音と集電系音を対象とし、それぞれ車軸端の軸箱位置および架線位置に、解析面に対して直径0.06mの円筒部を設け、円筒面に音圧境界条件を設定した。音源のパワーレベル(dB)は実車で取得が困難であったことから、車両下部音には沿線騒音予測手法⁴⁾によるレール近傍音計算値を、集電系音には鉄道総研所有の集電走行試験装置実測値(ともに約200km/h相当)をもとに、それぞれ音源の指向性と距離減衰の効果を補正した値を用いた。

図6に、周波数重み付け特性をAとした各音源の周波数特性を示す。なお、集電走行試験装置は装置台車の特性を含むため、実際の集電系音の特性とは異なる。

境界条件については車体、構造物の壁面を完全反射条件とし、図5中の紫線で示した境界では、地表の影響を無視し、音が無限空間へ放射することを想定して完全吸収境界条件(吸音率1)とした。なお、厚み方向の境界は完全反射条件とした。条件2の解析では、条件1の解析モデルに対して既設防音壁先端中央から高さ3m、厚さ8mmの空間に図4に示す風荷重低減型防音工の音響透過損失を実効密度および複素音速として与えた。

鉄道沿線騒音では、近接軌道中心から25m離れた観測点(以下、25m点)での騒音レベルで評価されることが多い。しかし、波動方程式を扱う周波数領域音響解析では音の波動性から音圧の疎密分布の影響が考えられる⁶⁾。そのため、本研究では、図5に示すように25m点付近に各解析周波数で少なくとも1波長を含む2m四方の評価空間を設け、評価空間の平均音圧レベルによって騒音低減効果を評価した。評価は200~1kHzの1/3オクターブバンド中心周波数とし、解析は1/9オクターブバンド中心周波数で車両下部音(内軌側および外軌側)、集電系音それぞれで実施した後、それらを合成したレベル値を比較した。なお、今回設定した解析条件からは、無限

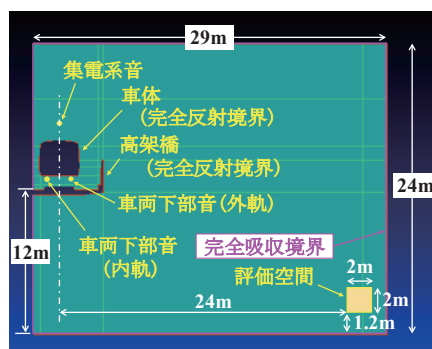


図5 解析モデルの概要(条件1)

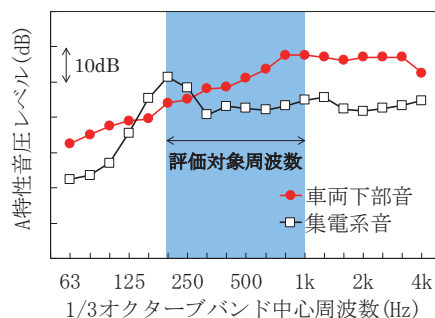


図6 音源の周波数特性(dB)

長干渉性線音源による2次元音圧レベル分布が得られることになる。これは実際の音源特性とは異なることに留意する必要がある。

4.3 解析結果

解析結果の例として、図7に音源を外軌側車両下部音とした時の車体周囲の、図8に音源を集電系音とした時の解析空間全体のそれぞれ500Hz(純音成分)での音圧レベル分布を示す。図7では車体下部と軌道や床版上面間、車体側面の外軌側と防音壁間で音圧レベルが高くなっている。これは音源が近く、各壁面間で繰り返し音の反射が生じているためと考えられる。条件1では車体側面で反射した音が防音壁上部へ到達し、高架橋の外に向かって放射している。それに対し、条件2では嵩上げ部でも音の反射が生じ、条件1と比較して車体上部での音圧レベルが高い一方で、高架橋外の防音壁高さ以下においては音圧レベルが低く、防音壁の嵩上げによる伝搬音の抑制効果が認められる。図8でも、防音壁嵩上げによって伝搬音が遮蔽され、特に防音壁高さ以下で音圧レベルが低くなっている様子が確認できる。

図9に、各条件での車両下部音および集電系音の各1/3オクターブバンド中心周波数での評価空間内音圧レベルの比較結果を示す。各条件の差は風荷重低減型防音工の設置による騒音低減効果を示す。車両下部音では500Hzでの条件間の差異が小さいのに対し200~315Hzや630Hz、800Hzで低減量が大きい等、周波数

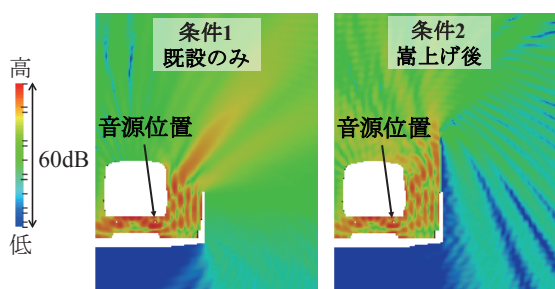


図7 外軌側車両下部音の音圧レベル分布 (500Hz)

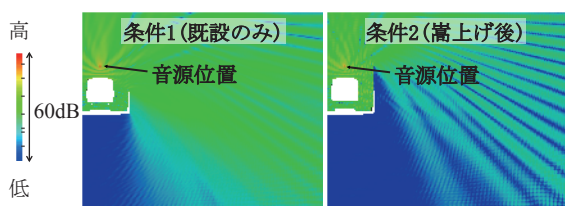


図8 集電系音の音圧レベル分布 (500Hz)

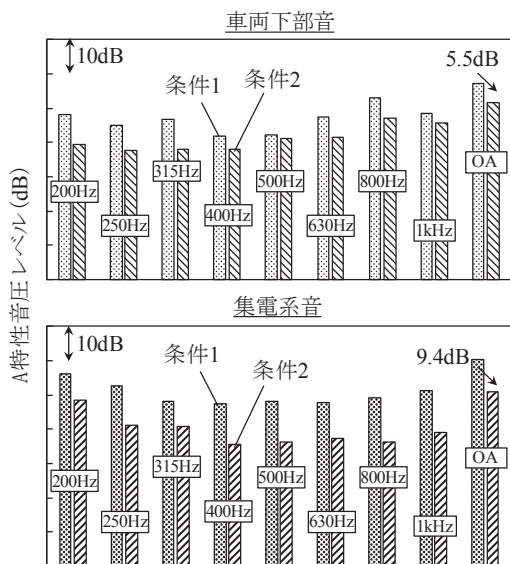


図9 評価空間での音圧レベル比較値

によって騒音低減効果に違いが見られた。それに対し、集電系音では周波数による騒音低減効果の違いは小さい。これは、防音壁の嵩上げによって、車両下部音に対しては車体壁面等での音の多重反射が複雑になり、かつ、周波数によってその音の伝搬特性が異なることが影響している一方、集電系音に対しては伝搬音を直接遮蔽する効果が大きいととえられる。風荷重低減型防音工設置による騒音低減効果 (OA 値) は、車両下部音および集電系音で、それぞれ 5.5dB と算出された。

以上のように、周波数領域での音響解析では周波数毎に音の伝搬特性を評価することが可能である一方、評価時には音の波動性を考慮しつつ活用することが必要と考えられる。なお、解析結果の妥当性については、今後、模型実験等によって検証していく予定である。

5. 施工試験と列車走行試験による実用性評価

5.1 施工試験

風荷重低減型防音工の実用性を評価するため、鉄道沿線にて施工試験および列車走行試験を実施した。

風荷重低減型防音工は主として新幹線の高架橋区間での適用を想定しているが、本試験は在来線沿線の地上にて実施した。試験では、3m 間隔で設置した 4 本の H 型鋼の支柱間 (全長 9m) に、既設コンクリート防音壁に見立てたコンクリートパネルを落とし込み、その上部で中央の支柱間に風荷重低減型防音工を設置した。なお、線路方向の両側には、次節で述べる列車走行試験を実施するため、音の回り込みの影響の抑制を目的として従来型の透光型遮音板 (従来品) を設置した。施工試験の結果、支柱とは板ばね式の固定具によってぐらつき等無く固定することが可能で、従来品と同等の施工性を有することを確認した。

図 10 に風荷重低減型防音工の設置状況を示す。

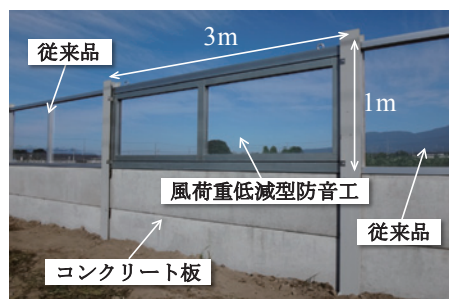


図 10 風荷重低減型防音工の設置状況

5.2 列車走行試験の概要

列車走行音に対する風荷重低減型防音工の遮蔽性能を評価するため列車走行試験を行った。試験では、風荷重低減型防音工設置前後での列車走行時の騒音レベルを測定し、両者の比較から挿入損失を求めた。図 11 に風荷重低減型防音工と騒音レベルの測定点の位置関係を、図 12 に列車走行試験の実施状況を示す。測定点は、線路方向に対して風荷重低減型防音工設置中央断面上とし、近接側まくらぎ端から 2m の近傍点 (A 点)、風荷重低減型防音工裏面点 (B 点)、B 点の直上 1.1m 点 (C 点) の 3 点とした。A 点および B 点の高さはレールレベルから 0.45m である。測定には普通騒音計 NL-20 (リオン (株) 製) を用い、時間重み付け特性を F、周波数重み付け特性を A とした。対象周波数は 31.5 ~ 10kHz とし、1/3 オクターブバンド周波数分析によって 1 編成 (2 両) 通過時のパワー平均値を求めた。評価は設置前後で列車速度および A 点での騒音レベル (OA 値) が近いそれぞれ 2 編成 (No.1, No.2 とする) を対象とした。

5.3 列車走行試験の結果および考察

図13に、A～Cの各測定点での測定結果を示す。この結果、A点での周波数特性は、設置後No.2が400Hzで他と比較して高くなっているが、それ以外は設置前後の差異は小さいと判断された。なお、設置後No.2で400Hzが他より高いのは、他列車との比較から車両機器音等の影響と考えられる。B点およびC点では、設置後No.2は設置後No.1と比較してA点と同様に400Hzでやや高い値を示したが、設置前後それぞれで比較するとNo.1とNo.2の間の差異は小さいと判断された。設置前後の違いについては、B点およびC点とも63Hz以上で設置後の音圧レベルが低下し始め、B点での低減量はC点と比較して大きくなった。これは、B点がC点よりも音源との行路差が大きく、上部、側方からの音の回り込みの影響が小さいためと考えられる。一方、31.5～50HzではB、C点とも設置前との差異は小さかった。これらの低い周波数では音の回り込みの影響や、遮音板に対する透過音の影響も考えられ、本試験での設置延長距離や設置高さ、遮音板に対する測定点の位置関係等の試験条件に依存したものと推察される。本設置条件にお

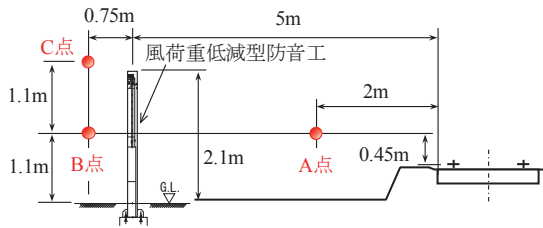


図11 測定点の位置関係

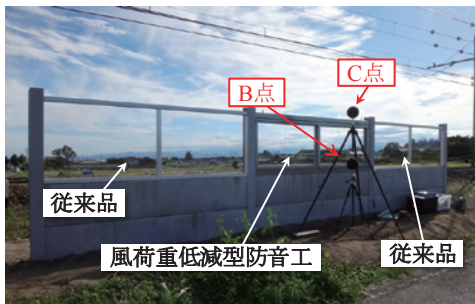


図12 列車走行試験の実施状況

ける風荷重低減型防音工の遮蔽性能として、風荷重低減型防音工裏面のB点での設置前後のOA値で約13dBの低減が得られた。

また、B点での測定結果に着目すると、風荷重低減型防音工において遮音板周囲の隙間からの音漏れによると考えられる減音量の大きな低下は認められず、実用上は遮音板周囲のゴム材によって十分な遮音性能が得られていると判断された。

6. 屋外暴露試験による実用性評価

6.1 試験の概要

風荷重低減型防音工の開閉動作については、これまで風洞試験によって評価を行っていたが¹⁾、風洞試験での風は時間(秒)当たりの変動が小さく、自然界で観測される風の変動特性とは異なることが想定される。そこで、本研究では自然風での開閉動作を検証するため屋外暴露試験を実施した。また、風荷重低減型防音工が長期間屋外で使用されることを想定し、使用材料の経年劣化の影響について評価を実施した。

6.2 自然風に対する開閉動作の検証

実用サイズの風荷重低減型防音工を用い、台風通過の多い沖縄地域にて実施した。過去の気象データでは、実際に風速35m/sが観測される可能性は低いと考えられたため、動作確認を優先し風速15m/s程度で開くよう設定した。試験は、2014年8月から2016年12月までの2年4ヶ月間実施した。

試験の結果、2014年の台風19号および2015年の台風15号の接近時に遮音板が動作したことを確認した。図14に、2014年10月の台風19号接近時の遮音板の動作状況を示す。遮音板が開き始めてから閉じるまでの時



図14 自然風による遮音板の開閉

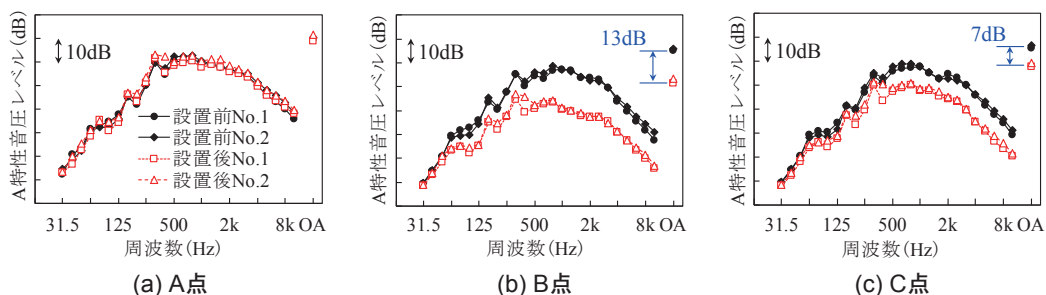


図13 各測定点での測定結果

特集：空気力学・騒音

間は実際の風荷重の作用時間に依存すると考えられるものの、本試験では風の変動に応じて4秒間程度の短時間でも開閉動作したことを確認した。

6.3 経年劣化の影響

2年4ヶ月に渡る暴露試験後の各部材の経年劣化の状況について調査した。図15に解体後のクローザ軸を、表1に、各部材と経年による影響についての評価結果を示す。表1に示すように各部材やクローザ軸に顕著な劣化は確認されず、良好な耐久性を有していると判断された。磁石については、磁力の低下率が2011年の製作時から本試験での暴露終了時までの約5年間で約3%であり、長期間十分な磁力を保持していることが確認された。

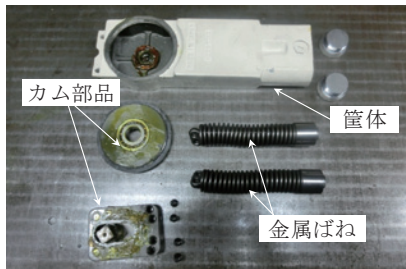


図15 解体後のクローザ軸

表1 暴露後の経年劣化評価

部材	状況等
ポリカーボネート板	顕著な劣化の影響無し（良好）
枠等の金属部材	顕著な劣化の影響無し（良好）
クローザ軸	錆やグリスの変色無し（良好）
磁石	磁力低下率3%*（良好）

*2011年開発時からの暴露終了までの5年間の変化率

7. まとめ

風荷重低減型防音工を対象に、遮音性能評価および高架橋設置時の騒音低減効果の予測評価、屋外暴露試験による開閉動作の検証および耐久性について評価を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1)音響試験の結果、遮音板周囲からの音漏れの影響は小さく、125～2kHzのオクターブバンド音響透過損失平均値は約29dBで厚さ8mmのポリカーボネート板と同等以上の遮音性能を有していることを確認した。
- 2)有限要素法による周波数領域音響解析の結果、車両下

部音および集電系音を定常音源とすると風荷重低減型防音工の設置によって車両下部音に対して5.5dB、集電系音に対して9.4dBの騒音低減効果が見込まれた。また、本評価手法は、音源からの伝搬音の予測に対して有用であると判断された。

- 3)施工試験の結果、既存の嵩上げ用透光型遮音板と同等の施工性を有していることを確認した。
- 4)列車走行試験の結果、実高架橋上に設置した状況とは異なるものの、63Hz以上で騒音低減効果が確認され、OA値で13dBの騒音低減量を確認した。
- 5)屋外暴露試験では、台風での遮音板の開閉動作を確認した。試験後の解体調査では構成部品に不具合等は無く、良好な耐久性を有していると判断された。

今後は、風荷重低減型防音工の実用化に向けた取り組みを強化すると同時に、音響模型試験等により音響解析の妥当性について検証する。また、吸音対策を合わせて実施した場合の性能向上による騒音低減効果についても評価を行っていく予定である。

謝辞

本研究の実施に当たり、日本ドアチェック製造(株)、(株)下西製作所、上毛電気鉄道(株)、沖縄都市モノレール(株)の協力を得た。未筆ながら謝意を表す。

文献

- 1) 佐藤大悟, 半坂征則, 間々田祥吾, 木山雅和, 小笹武史: 鉄道高架橋用風荷重低減型防音工の開発, 騒音制御, Vol. 39, No. 40, pp. 110-119, 2015
- 2) ポリカエース技術資料 (住友ベークライト), p.18, 2010
- 3) 前川純一: 障壁(塀)の遮音設計に関する実験的研究, 日本音響学会誌, vol.18, pp.187-196, 1962
- 4) 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
- 5) アドバンスシミュレーション Vol.15, アドバンスソフト, 2013
- 6) 佐藤大悟, 木山雅和, 小笹武史: 可動部を有する透光型遮音板の列車走行音に対する防音性能評価, 第27回環境工学総合シンポジウム2017講演論文集, pp. 140-143, 2017