

3407 鉄道用防音材の開発

The Development of Soundproof Materials for Railway

○西村 充史 (鉄道総研)

[機] 半坂 征則 (鉄道総研)

[土] 鈴木 実 (鉄道総研)

[土] 生駒 信康 (シバタ工業株)

Atsushi NISHIMURA, Masanori HANSAKA, Minoru SUZUKI,
Railway Technical Research Institute, Hikarityou2-8-38, Kokubunji-city, Tokyo
Nobuyasu IKOMA, SHIBATA INDUSTRIAL CO.,LTD.

In order to develop the railway soundproof walls, which are so light to install easily, we studied on the various noise reduction materials. As the result, we have developed two types of the soundproof materials that are made of rubber. One is a block type to use a solid rubber plate with steel net, which is lighter than the conventional materials. The other is a chip type that has a porous structure by combining rubber chips. Experimental results show that the block type has higher sound preventing performance than the conventional materials all over the range of frequency and chip type has higher performance below 2.5kHz.

Key words; soundproof, railway, rubber, sound preventing performance

1. はじめに

鉄道において騒音対策は重要な課題のひとつである。特に近年、車両の高速化や軌道の高架橋化、ダイヤの高密度化が進む一方で、沿線住民の静寂な住環境を求める志向が高まっている。これに伴い、鉄道沿線に対する騒音、振動対策の必要性が高まってきている¹⁾。これに対し、鉄道沿線に防音壁を敷設することは、鉄道における騒音対策の中心的役割を担ってきた²⁾。しかし、防音壁材料として使用されている石膏やモルタル板は、アスベストを含有している場合もあり、沿線住民や作業者の衛生上の課題を有している。また、概して防音壁は重量物であり、施工が容易でないという課題を有している。防音壁を高架橋や橋梁に敷設する場合には、その課題は一層顕著になる。

そこで、アスベストを使用せず、衛生上問題のない材料でかつ、施工性を改善するため20%以上の軽量化の目標を達成できる新たな鉄道沿線用防音材として、ゴム製防音材(Sound reduction rubber net, 以下RNと称する)を以下の構想に基づいて開発した。

①ゴム材料に鋼製金網を埋設した構造を有し、ゴム材料の柔軟性・軽量性・振動減衰性を保持しつつ、材料に自立性を付与することを特徴とする。この材料は、中実の板状を基本型とする(ブロック型)。

②基本構造は①と同じ構造とするが、ゴム層を細かいゴムチップを結合した多孔質体構造とすることにより、防音材に吸音効果を持たせる(チップ型)。

②のタイプを検討した理由は以下による。防音壁は主として材料の遮音性能により騒音を低減するものであるが、同質材料の場合、遮音性能は材料の質量(面密度)に依存するため、ゴム材料を適用して軽量化する際に遮音性能が低下することが懸念された。このために、吸音効果の付与により遮音性能の低下を補うことを期待した。

この鉄道用ゴム製防音材について、遮音性能や吸音性

能等の基礎的な音響特性を評価した。以下にその結果について報告する。

2. 開発品の材質

本開発品のゴム材には、鉄道用防音材が一般に鉄道沿線において長期間使用されることを考慮して、難燃素材でかつ耐候性にも優れるクロロプレンゴム(CR)を使用した。また、埋設した金網には径4mmの鋼材(SS400)を使用した。

3. 音響特性評価試験

3.1 試験項目

試験項目は、遮音性能の指標として音響透過損失レベルを測定した。チップ(結合)型に関しては、吸音性能の指標として垂直入射法吸音率も測定した。

3.2 試験片

試験品は現用防音壁材(厚さ16mm, 現用材と称する)とゴム製のブロック型とチップ型の開発品とした。ただし、試験片厚さは以下のとおりとした。音響透過損失レベルの試験片に関しては現用品なみの16mmおよび比較のために30mmとした。一方、吸音率試験片に関しては、厚さの吸音性能に与える影響を評価するために、16, 20, 30および40mmの4種類とした。

Table1 Weight per area of samples

Sample; thickness	Symbol	Weight per Area (kg/m ²)
RN-block type; 16mm	RN-Type A	24.4
RN-block type; 30mm	RN-Type A	44.2
RN-chip type; 16mm	RN-Type B	18.9
RN-chip type; 30mm	RN-Type B	32.8
Current material; 16mm	Current mat.	33.2

試験片形状については、音響透過損失レベルの測定については約 500mm×500mm×上記厚みの板状とし、垂直入射法吸音率の測定に関しては約 100mmφ×上記厚みの円柱状とした。音響透過損失レベルの試験片の面密度は、表 1 に示すとおりである。

3.3 試験方法

(1) 音響透過損失レベル

音響透過損失レベルの測定方法は以下のとおりである。上面に 400 mm×400 mm の開口部を設け、内部に 6 本のインテンシティマイクロホン MI-1233* および 8cm フルレンジスピーカ*を設置した 915 mm×1060 mm×1210 mm サイズの木製残響箱を半無響室内に静置し、箱上面の開口部に試験片を固定した。スピーカでランダム正弦波による定常音を発生させ、その時の箱内部の音圧をインテンシティマイクロホンで測定するとともに、箱上部約 10 mm の距離をインテンシティブローブ MI-6410*により手動でスキャンして箱外の音圧を測定し、両音圧のレベル差を算出した。図 1 に試験状況を示す。

なお、周波数範囲は 50Hz～6.3kHz とした。

*小野測器(株)製

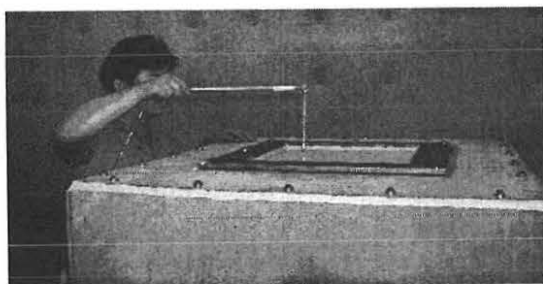


Fig.1 Measurement of sound reduction index

(2) 垂直入射法吸音率

垂直入射法吸音率の測定方法は、JIS A1405(音響インピーダンス管による吸音率及びインピーダンスの測定一定在波比法)に準じて行った。

3.4 試験結果と考察

(1) 遮音性能

図 2 に音響透過損失レベルの測定結果を示す。この結果、以下のことが認められた。

①ブロック型開発品の音響透過損失レベルは、厚さ 16mm、30mm の試験片ともに 250Hz 以上の範囲では、すべての周波数帯域において現用材より高い値を示した。鉄道騒音では 500Hz 以上の周波数範囲の成分が大きい³⁾ために、鉄道用防音材に対してもその範囲における性能が重要といえる。このことを考慮すると、ブロック型開発品は、厚さ 16mm でも現用材より防音材として高い騒音低減効果が期待できる。

一般に遮音材料の質量が増すことによって、透過損失レベルが大きくなることが質量則より理論的に示されている³⁾。このことについては次章で詳しく述べるが、厚さ 16mm のブロック型開発品について考えると、同厚の現用材に比較して軽量であり、質量則の観点からは不利であるにもかかわらず、高い遮音性能を有していることが認められる。この理由については次のように考える。遮音材料に音波が入射すると、材料の振動が励起され、これにより材料の反対側に音が放射(2

次放射音)される。この音圧差が音響透過損失レベルとなるが、ブロック開発品の材質は現用材より高い振動減衰性能を有するゴム材であるために材料の振動が抑制されるため 2 次放射音が低減され、これにより音響透過損失レベルが増大したものと考えられる。

②チップ型開発品の音響透過損失レベルは、厚さ 16mm の試験片に関して、2kHz 以下の周波数範囲では現用材よりおおむね高い値を示すが、3.15kHz の周波数範囲では現用材より低い値を示した。

この原因として、チップ型開発品は多孔質体であるため、表 1 に示すようにブロック型開発品よりもさらに軽量であり、この影響が考えられる。しかし、後で詳しく述べるが、チップ型開発品の高周波数範囲における音響透過損失レベルの低さは質量減少の影響を越えるものと認められる。こうしたチップ型開発品の高周波数範囲における音響透過損失レベルの低下の原因として、高周波数範囲ではチップ型開発品のチップを結合している膜層の入射音波により共鳴、入射音波と全体の共振現象などのメカニズムが推定された。

③ブロック型とチップ型の開発品の音響透過損失レベルを厚さ 16mm の試験片について比較すると、2kHz 以下の周波数範囲で両者の音響透過損失レベルは同等であったが、2.5kHz 以上の高周波数範囲でチップ型はブロック型より明確に低い値を示した。この理由についても、チップ型開発品のチップ結合膜層の共鳴などが推定された。

④ブロック型については、厚さ 30mm の試験片の音響透過損失レベルは厚さ 16mm の試験片に比べ、ほぼすべての周波数帯域で高い値を示すなど、ほぼ質量則にそった特性を示した。しかし、チップ型では、1～3.15kHz の範囲で厚さ 30mm の試験片の方が低い値を示すなど複雑な特性を示した。この理由としても、チップの結合膜層の共鳴などの振動特性の寄与が考えられる。

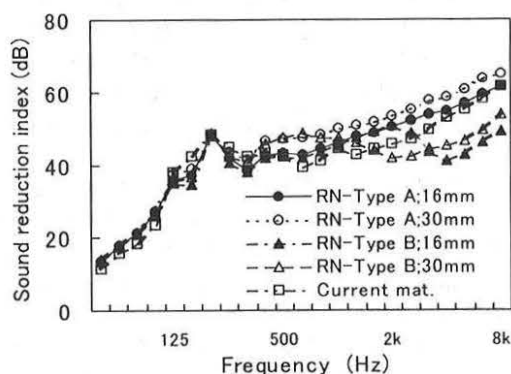


Fig.2 Sound reduction index R of type A and B of RN and current material

(2) 吸音性能

図 3 に、チップ型吸音材の垂直入射法吸音率を示す。この結果、以下のことが認められた。

①厚さ 16mm と 20mm の試験片の吸音率について 1kHz 以下の周波数範囲では多少の増減はあるものの、吸音率は 0.2 以下の低い水準で推移した。1kHz 以上の周波数範囲では周波数の増加に伴い増加する傾向を示した。

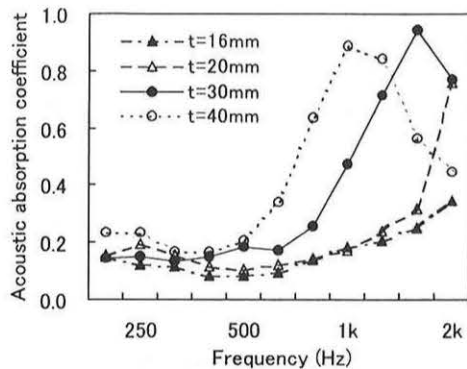


Fig.3 Acoustic absorption coefficient of RN-type B

このように厚さ 16mm と 20mm の試験片については 1kHz 以下の周波数範囲での吸音率は 0.2 以下であったが、それでも非多孔質の材料に比べれば吸音率は高い³⁾といえる。

- ②厚さ 30mm と 40mm の試験片の吸音率については測定範囲(200Hz~2kHz)においてピーク値を示した。ただし、吸音率のピークは 40mm 試験片の方が低周波数側にシフトしている。

一般に多孔質の吸音材においては、材料厚さの増加に伴って吸音率のピークは低周波数側にシフトすることが知られている³⁾。厚さ 30mm と 40mm の試験片では測定結果にその傾向が認められる。また、厚さ 16mm と 20mm の試験片では吸音率のピークは測定範囲上限の 2kHz 以上の高周波数領域にあるものと推定される。

(3) 総合評価

以上の測定結果に基づき、開発品の防音性能を評価すると次のようになる。まず、ブロック型については厚さ 16mm においても現用材以上の防音性能を有しているものと判断される。より軽量化のメリットを求めるためにはさらに薄い材料の適用も考えられる。

チップ型開発品については、厚さ 16mm において、2.5kHz 以下の周波数範囲ではブロック型より軽量にもかかわらず、同品と同等の遮音性能を示し、吸音効果が機能している可能性が推定される。ただし、2.5kHz 以上ではその遮音性能はブロック型より低く、3.15kHz 以上では現用材よりも遮音性能が低下する。よって、鉄道騒音では一般に車両速度の高速化に伴って、2kHz 以上の高周波数成分が増大³⁾するので、新幹線等の高速区間にチップ型を適用するためには改善する必要がある。

4. 理論と実測の比較

本章では、前章で述べた試験結果に対して、遮音性能に関する理論計算値と比較し、開発品の遮音特性を明確にする。

本試験において、残響箱内で発生する音波はほぼ拡散状態にあるといえる。このように拡散音場にさらされた遮音材の音響透過損失 TL は、次式で与えられる。

$$TL = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

$$\tau = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{\cos \theta \sin \theta d\theta}{|1 + Z_w \cos \theta / 2\rho c|^2} \quad (2)$$

ここで、 Z_w は遮音材の機械インピーダンス(kg/m²)、 ρ は空気密度(kg/m³)、 c は音速(m/s)である。

いま、 Z_w が遮音材の質量リアクタンスに依存する(質量則)と仮定すると、式(1)は次式で与えられる。

$$TL = 20 \log a - 10 \log [\ln(1 + a^2)] \quad (3)$$

$$a = \frac{\omega m}{2\rho c} \quad (4)$$

ここで、 ω は角周波数、 m は遮音材の面密度(kg/m²)である。なお、今回の試験状況における、以上の理論計算式の適用範囲は 500Hz 以上である。

式(4)による計算値と実験値を以下に比較する。図 4(a)に現用材、(b)にブロック型開発品、(c)にチップ型開発品の音響透過損失レベルの計算値と実験値を示す。

その結果、以下のことが考察された。図 4(a)と(b)より、現用材、ブロック型吸音材ともに音響透過損失レベルの実測値は 500Hz 以上のすべての周波数帯域で計算値より高い値を示した。ただし、ブロック型開発品に比べれば現用材では計算値と実測値の差異は小さい。上記のように音響透過損失レベルの実測値が計算値より高い値を示した理由のひとつとして、実際には開発品の機械インピーダンスが、単純な質量則で推定される値より大きいことが推察される。その有力な因子として、材料の振動減衰能が考えられる。

現用材においても鋼材などに比べれば振動減衰能は高く、この因子が作用するために 2 次音響放射が抑制される。その結果として、質量則で予測される以上の遮音性能が与えられたものと考えられる³⁾。

ブロック型開発品に関しては、上述のように現用材よりさらに振動減衰能が高いために、遮音性能がさらに高められたことが推定される。

チップ型開発品に関しては、吸音による音響効果に加えて、前述のように結合膜の共鳴などの複雑な振動特性が作用していることが推定される。以下に、チップ型開発品におけるこれらの因子の作用を考察する。

チップ型開発品では、ブロック型開発品にはない遮音因子として以下のものが考えられる。

- (1) 吸音効果の作用；遮音性能を高める作用が推定される。
(+因子)

以下、遮音性能を高める作用を + 因子、減じる作用を - 因子で示す。

- (2) 多孔質体に成型したための質量減少の影響；チップ型開発品は多孔質体であるために、同じ厚さで比較するとブロック型開発品より質量が若干小さい (- 因子)
(3) その他の要素の影響；例えばチップ結合膜の共鳴などの振動特性 (- 因子)

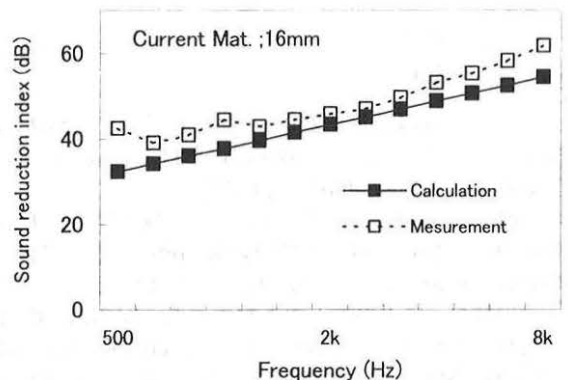
これらを考慮して、チップ型防音材とブロック型防音材が同じ厚さの場合の音響透過損失レベルを次式(4)のように仮定した。

$$TL_C = TL_B + \Delta TL_1 + \Delta TL_2 + \Delta TL_3 \quad (4)$$

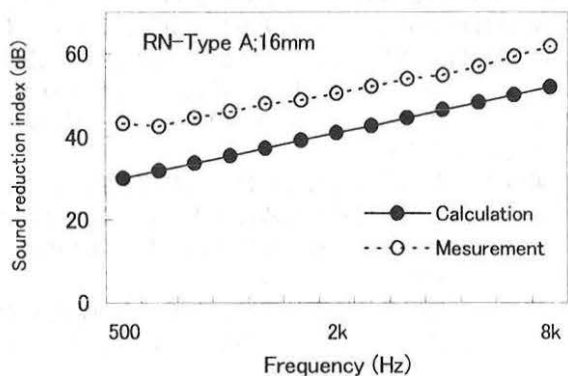
ここで、 TL_C はチップ型の音響透過損失レベル(dB)、 TL_B はブロック型の音響透過損失レベル(dB)、 ΔTL_1 は吸音効果の作用(dB)、 ΔTL_2 は多孔質体に成型したための質量減少の影響(dB)、 ΔTL_3 その他の要素の影響 (dB) である。

ここで、式(4)にチップ型開発品(厚さ 16mm)の面密度を適用して求めた計算値から、ブロック型開発品(厚さ

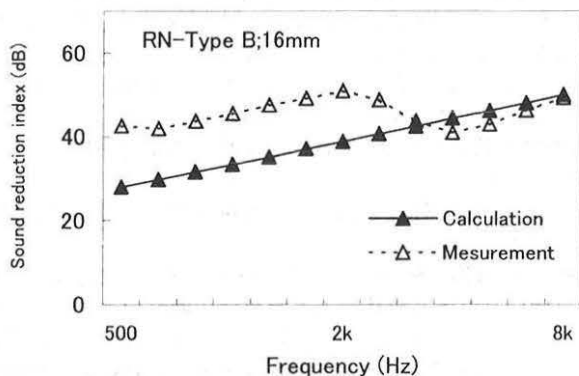
16mm)の面密度を適用した計算値を差し引くことにより ΔTL_2 を求める。そして、 TL_B (厚さ 16mm のブロック型開発品の実測値) $+\Delta TL_2$ と TL_C (厚さ 16mm のチップ型開発品の実測値)を比較することにより、 ΔTL_1 および ΔTL_3 の大きさを評価した。



(a) Current material; 16mm



(b) RN-Type A; 16mm



(c) RN-Type B; 16mm

Fig.4 A comparison of calculation with measurement sound reduction index R

図5にチップ型開発品とブロック型開発品を同重量に補正した TL_C と $TL_B+\Delta TL_2$ を示す。この結果、2kHz以下では $TL_C > TL_B + \Delta TL_2$ であり、この範囲では吸音による効果によりチップ型開発品の遮音性能が実質的に若干高められていることが推測される。その一方で、2.5kHz以上では $TL_C < TL_B + \Delta TL_2$ であり、この範囲ではチップ結合膜の共鳴などの遮音性能を減じる因子の作用が卓越するものと考えられる。

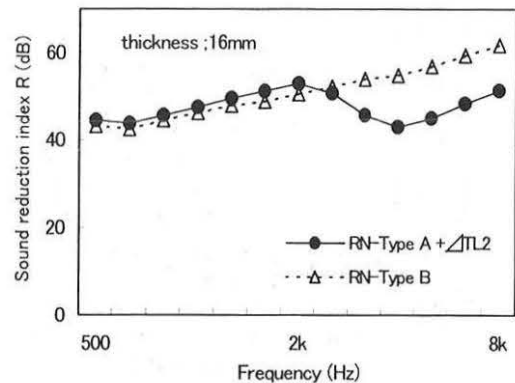


Fig.5 Comparison of sound reduction index R of RN-Type B and corrected value of RN-Type A

5. まとめ

- 1) ゴム材に鋼製金網を埋設した構造の新たな鉄道用防音材は、ブロック型、チップ型の2種類を試作した。
- 2) ブロック型開発品は、現用材と同厚のときでも、軽量であるにもかかわらず現用材より全般的に高い遮音性能を示した。ブロック型開発品の遮音性能が高い理由として、同材料が高い振動減衰能を有するためであることが推定された。
- 3) チップ型開発品は、2.5kHz以下の周波数範囲では現用材よりおおむね高い値を示すが、3.15kHzの周波数範囲では現用材より低い値を示した。この範囲においてチップ型開発品の遮音性能が高い理由のひとつとして、吸音効果の作用が推定された。一方、チップ型開発品では高周波数範囲で遮音性能が低下しており、この理由のひとつとして、チップを結合している膜層が、入射音波により共鳴するなどのメカニズムが吸音効果を卓越してしまうことが推定された。

なお、このチップ型開発品では将来的には、使用済みのゴム材料を回収し、細粒化したものを結合することによるリサイクルシステムの導入も可能と考えられる。

参考文献

- 1) 伊倉隆他：だいがく，27，288 (1981)。
- 2) 善田康雄他：現場実務者のためと設計者のための実用騒音・振動制御ハンドブック，エヌ・ティー・エス (2000)
- 3) 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック，技報堂 (1967)