

騒音低減効果の大きな高架道路裏面吸音板の開発

田中俊光(工博)*・杉本理恵*・木下伸一*・林 信輝**・吉村登志雄**・岩井健治(工博)***

*技術開発本部・機械研究所 **都市環境カンパニー・構造技術部 ***アルミ・鋼カンパニー・技術部

Development of Highly Effective Sound Absorbing Panel for the Underside of Elevated Roads

Dr. Toshimitsu Tanaka・Rie Sugimoto・Shinichi Kinoshita・Nobuteru Hayashi・Toshio Yoshimura・Dr. Kenji Iwai

Highly effective sound absorbing panels for the underside of elevated roads were developed. The panel's multi-layered structure of glass wool, air, thin film, perforated facing and the extruded aluminum frame with vibration damping resin was acoustically optimized through boundary element analysis and the one-dimensional transfer matrix method. Over 10 dB of sound reduction for solid borne noise and a 0.93 oblique incidence sound absorption coefficient were achieved.

まえがき = 国道 43 号線騒音訴訟判決や環境騒音基準の新規見直しなどの例に見られるように、沿道の騒音環境改善への社会の関心は高い。

とくに、大都市やその周辺部の道路では、2 層構造の場合も多く、下層の道路を走行する自動車からの騒音が上層の高架道路の裏面で反射し、道路周辺の騒音を増大させることがある。

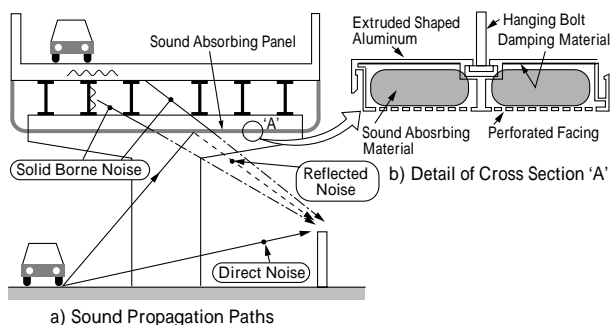
また、高架構造の不連続や伸縮装置部の段差などによる大型車両走行時衝撃力などが加振源となって、そのような部位からの構造物音が問題となる場合もある。

このような状況の中で、これらの騒音を効果的に減音させる騒音低減効果の大きな高速道路裏面吸音板の開発を進めてきた。そして、阪神大震災の復旧に合わせて実施された高速道路の騒音対策の一つとして採用されたほか、名古屋地区高速道路や鉄道橋などで施工されている。

1. 高架道路裏面吸音板の全体構成

本稿で述べる高架道路用裏面吸音板は、第 1 図 a) に示すように、鋼桁表面や床版裏面からの固体音を取り囲んで遮蔽するとともに、下層の道路からの自動車騒音を遮蔽体裏面で吸音して沿道への反射を防止するものである。

遮音体は、第 1 図 b) に示す幅 300mm のアルミ押出し型材を構成要素とし、型材の主要内面に熱融着された制振材料により高い振動減衰性を有する。また、その内部に配置した吸音材によって、裏面の多孔板を通過して



第 1 図 上層道路の裏面に設置された高架裏面吸音板
Fig. 1 Sound absorbing panel under the elevated road

入射した音波を吸音する。

2. 構造物音の低減対策

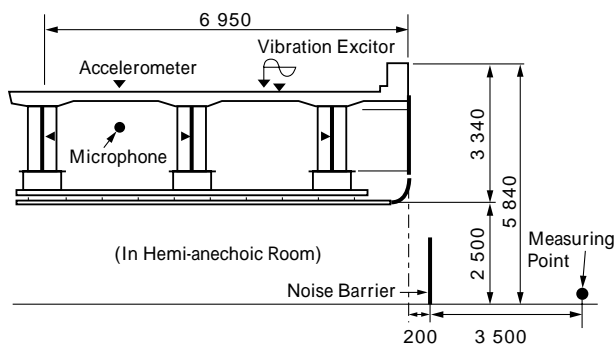
構造物からの振動伝搬による裏面吸音板における 1 次固体音の発生、およびコインシデンス現象による遮音性能の低下を抑止するために、非拘束型制振材料をアルミ押出し型材に熱融着して振動減衰性を持たせている。また、隣接する型材間の気密を確保し漏れ音を防止するために、型材の両側部を嵌ごう構造としている。この制振型材の 1 次固体音や 2 次固体音（透過音）に対する有効性は、すでに新幹線車両への適用¹⁾で確認されており、鋼桁や床版からの構造物音に対しても高い遮音性能をえることができる。

2.1 実物大模型による低減量評価実験方法

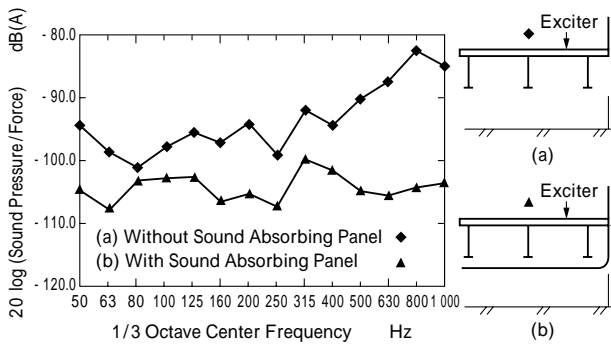
第 2 図に示す実物大の高架道路模型を当社大型半無響室内に設置した。模型の橋軸方向長さは 6m、鋼床版厚みは 12mm、アスファルト厚みは 80mm である。本吸音板がある場合とない場合のそれぞれにおいて、インパルスハンマで道路上面を打撃加振して加振力と受音点における音圧との伝達関数を測定し、本吸音板による構造物音低減量を評価した。

2.2 構造物音の低減量

第 3 図に、構造物音の主要帯域である 1kHz 以下の実験結果を示す。本吸音板がある場合とない場合との差異



第 2 図 大型半無響室内に設置された実物大高架道路模型と騒音評価位置
Fig. 2 Full-sized model of elevated road in large hemi-anechoic room and measuring point of noise



第3図 裏面吸音板による構造物音の騒音低減効果実験値
 Fig. 3 Experimental results of attenuation for solid borne noise from elevated road by setting sound absorbing panel

から、本吸音板による構造物音低減量は周波数が高くなるほど大きくなり、最大20dB程度となることがわかる。

実際の自動車走行時の構造物音低減量は、次のように推定した。まず、実際の自動車走行時の高架道路主桁の近接音を実測する。次に、その各1/3オクターブバンドレベルから、第3図よりえられる各1/3オクターブバンドの騒音低減量を差し引く。これを全バンドについてエネルギー加算して算出したオーバオール値は、本吸音板設置による構造物音低減量を考慮した近接音推定値と考えることができる。そこで、このオーバオール値の本吸音板有無による差を、自動車走行時の構造物音低減量推定値として求め、第1表に示した。

3. 裏面反射音の低減対策

3.1 裏面吸音の効果

第4図に高架裏面吸音の効果に関する周囲音場のシミュレーション結果を示す。同図では、地面を完全反射面として取扱い、化粧板で桁が覆われた高架道路がその上部にある場合に、地面上0.5mの高さに位置する音源から放射される騒音による周囲音場を、化粧板の裏面に吸音性がない場合とある場合について自社開発した境界要素法ソフトウェア(ACOUSIS³⁾)によって求めた結果である。高架橋の裏面は高さ10m、高架道路路面は高さ13.5mに位置している。図中、1m間隔の格子状に設けた音圧評価点を中心とする円の半径は、音圧の相対振幅を表す。なお、周波数は1kHzである。また、吸音部位の吸音率は、垂直入射吸音率で1.0とした。

第4図から、高架道路下面の吸音の有無によって周囲の音圧分布は大きく変化することがわかる。吸音されていない場合には、裏面と道路の間で音波が多重反射されるために、音圧は増大して両側に広がっていく。いっぽう、高架裏面で吸音されている場合には、高架道路からの反射はなくなり、音波は半自由空間と同様に放射状に広がる。この結果から、高架道路裏面での吸音が周囲地域の騒音対策として有効であることが確認できた。

3.2 高性能吸音板の開発

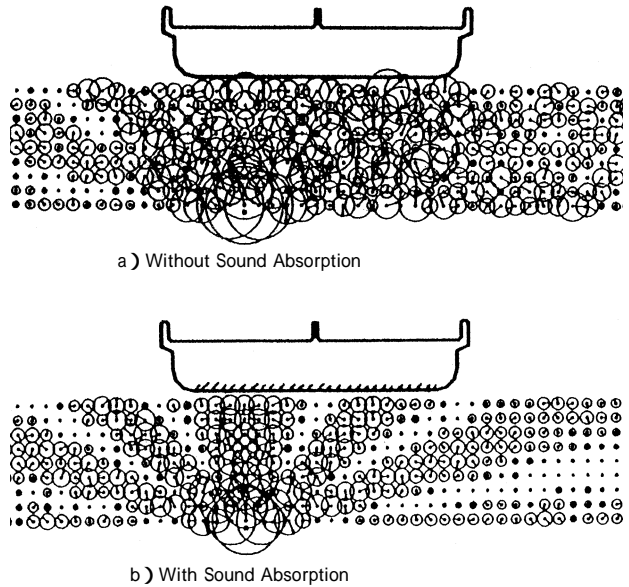
3.2.1 斜入射吸音率

「平成7年度の建設省技術評価制度」において、道路騒音対策用に使用される吸音板の吸音性能は、斜入射吸音率で評価される。

斜入射吸音率は、剛壁での反射音と吸音板での反射音

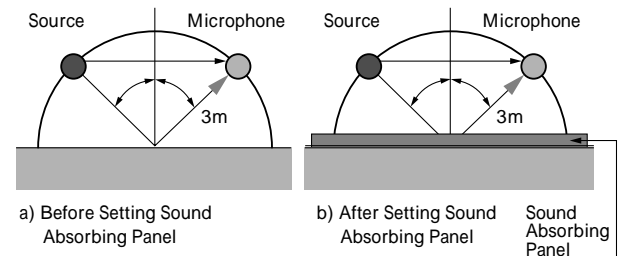
第1表 裏面吸音板による自動車走行時構造物音の低減量推定値
 Table 1 Estimated amount of attenuation for solid borne noise from elevated road by running car after setting sound absorbing panel

	Relative Noise Level dB(A)	
	Overtaking Lane	Traffic Lane
Without Panel	1.3	0.0
With Panel	13.9	11.8
Attenuation	12.6	11.8



第4図 高架裏面吸音による周囲音場の変化 (シミュレーション結果)

Fig. 4 Comparison between sound field around elevated road with/without sound absorption



第5図 斜入射吸音率の測定概念図

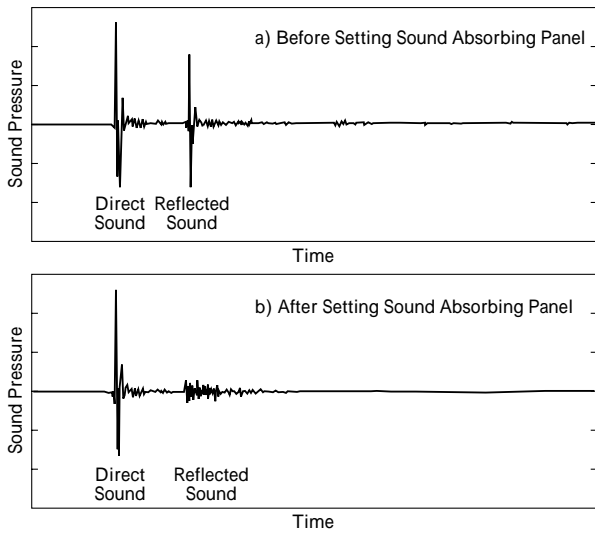
Fig. 5 Measurement system for oblique incidence sound absorption coefficient

のエネルギー比率から求められる。第5図に示すように、吸音板設置前後において、音源とマイクロホンに対称位置に設置して音源から試験音を発生させる。このとき、継続時間の短い試験音を使用すれば、行路差があるため第6図に示すように、直接到達する音波と反射して到達する音波が時間軸上で分離できる。そこで、反射波のみを取出して、周波数分析をおこなって斜入射吸音率を算出する。

3.2.2 境界要素法によるシミュレーション

1) 吸音材を含む領域のインパルス応答の解析手法

吸音材を含む音場については、空気と吸音材それぞれを音波が伝搬する均質な領域と考え、それらが接する境界において音圧と粒子速度の連続が成立する複数領域接続問題³⁾と考えることで、高精度な定常応答解析が可能



第6図 斜入射吸音率測定の時系列データ例
Fig. 6 Transient responses measured for oblique incidence sound absorption coefficient

である。

このような境界要素解析によってえた定常応答解を逆フーリエ変換して求めた評価点におけるインパルス応答を、時間軸上で直接音と反射音に分離し、斜め入射吸音率を評価した⁴⁾。

2) 解析結果の検証⁴⁾

グラスウール単層材について、シミュレーションと実験によって斜め入射吸音率を求め、その値を比較した。三次元モデルの使用は計算量が多くなるため、シミュレーションは二次元モデルによっておこなった。

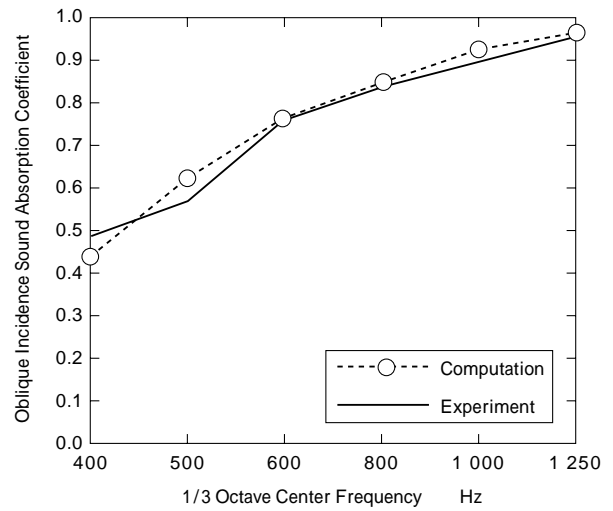
床を無限大の剛平面とし、音源は半径0.01mの呼吸円筒(36要素)でモデル化した。また、実験では50mm厚さのグラスウール、4×5mのものを持ち、二次元モデルでは50mm×5mのグラスウール領域に実効音速、実効密度の実測値を条件として与えた。空気領域は密度1.2kg/m³、音速340.0m/sとした。吸音材表面の境界は、1要素の長さが解析対象周波数における空気中および吸音材中の音波の波長の10分の1以下になるように、1要素約0.01mとした。計算容量および計算時間の制約から、400~1250Hzバンドの範囲で12.5Hz刻みの周波数応答解析をおこなった。

本シミュレーションと実験でえられた斜入射吸音率の比較を第7図に示す。両者の差は数%以下であり、実用上十分な精度がえられている。

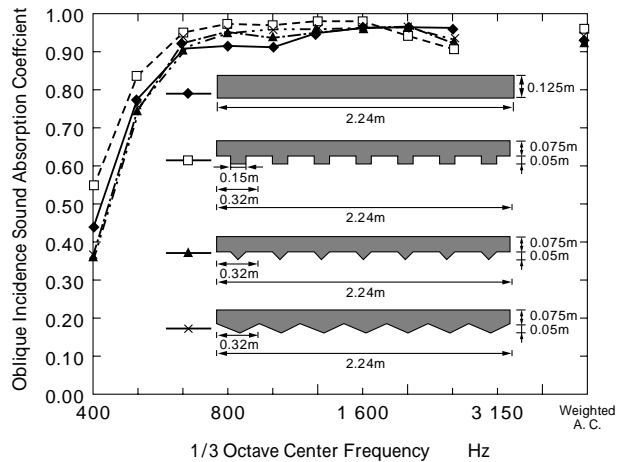
3) 吸音板形状の影響⁵⁾

第8図に、図中に示す4種類の形状の吸音板についてそれぞれモデル化し、本手法により求めた平均斜め入射吸音率を示す。解析モデルは、吸音板の幅を2.24mと小さくしたこと、高さおよび表面の形状以外については前項と同様であり、グラスウールで構成されるものとした。ここでは400~2500Hzの1/3オクターブバンドの範囲で解析をおこなった。

第8図より、形状によって斜め入射吸音率に差異があることがわかる。従来、高架道路裏面用の吸音に関して、円筒型などの散乱を利用した複雑な形が多くもちいられていた。しかし、このシミュレーション結果を見る



第7図 グラスウール単層の斜入射吸音率の実験値と計算値の比較
Fig. 7 Comparison between computed results and experimental results of oblique incidence sound absorption coefficient of glass wool layer

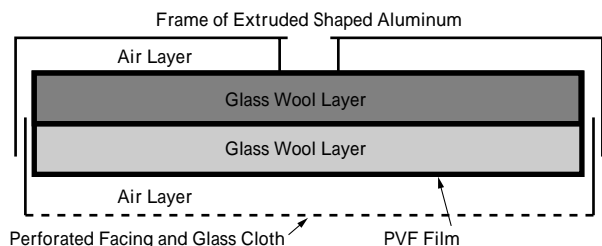


第8図 吸音板形状と斜入射吸音率計算結果
Fig. 8 Difference of computed oblique incidence sound absorption coefficients owing to shape of panels

と、道路交通騒音を考慮した重みつき平均斜め入射吸音率で、平型でも他の凹凸がある形状に匹敵する0.90がえられている。グラスウール単層という単純な構造の平型でこのような斜め入射吸音率の値がえられるということは、平型でも高性能な吸音板を開発できる可能性を示唆している。

3.2.3 吸音構造の最適化

高架裏面に使用する吸音板の基本構造は平型とし、低コスト化をはかるために、音響性能を確保しつつ吸音板厚さの薄肉化を目指した音響構造の最適化をおこなった。第9図に示すように、異なる密度のグラスウールを2層もちいて吸音率の向上を図った。吸音材は防水お



第9図 吸音板基本構造断面図
Fig. 9 Sectional view of basic structure of sound absorbing panel

よび耐候性向上のためにポリフッ化ビニル (PVF) で包み枠体に固定し、さらに、表面保護材としてグラスクロスの内貼りした多孔板を配置して、グラスウールの前面と背後に空気層をもうける構造とした。

グラスウールの厚み、かさ密度、空気層の厚み、および多孔板の開口率などが吸音性能に大きく影響を及ぼす。吸音板の厚さを可能なかぎり薄くするためには、これらのパラメータの最適化が必要になる。そこで、次元の伝達マトリックス法により吸音板構造をモデル化して、パラメータ最適化の検討をおこなった。

多孔板、空気層、フィルム (質量)、グラスウール (吸音材) それぞれの両端の音圧 p と粒子速度 u について伝達マトリックス形式で表すと、最終的に n 層で構成された吸音板の伝達マトリックスが式 (1) のように表せる。

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} p_1 \\ u_1 \end{Bmatrix} &= T_1 \ T_2 \ T_3 \ T_4 \ T_5 \ \dots \ T_n \ \begin{Bmatrix} p_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} \\ &= T \begin{Bmatrix} p_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_2 \\ u_2 \end{Bmatrix} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

音源側から見て、吸音板構造の終端は枠体になり、その境界条件としては粒子速度 $u_2=0$ となる。この条件を式 (1) に代入すると表面インピーダンス Z_1 (音圧 p_1 と粒子速度 u_1 の比率) は式 (2) で表せる。

$$Z_1 = \frac{p_1}{u_1} = \frac{a}{c} \dots \dots \dots (2)$$

この表面インピーダンス Z_1 と垂直入射吸音率 の関係は式 (3) で表される。

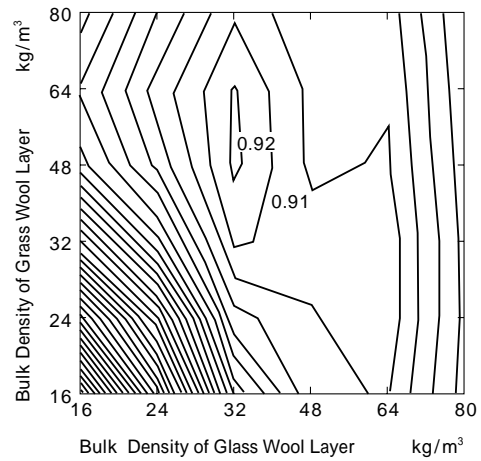
$$= 1 - \frac{Z_1^2}{Z_1^2 + \rho_0^2 c_0^2} \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 ρ_0 と c_0 は空気密度と空気中の音速である。垂直入射吸音率と斜入射吸音率は厳密には異なるが、音響設計をおこなう上で、支障のないことを確認している。この吸音モデルをもちいて音響構造を最適化するために、さまざまなパラメータを与えて吸音率を算出した。

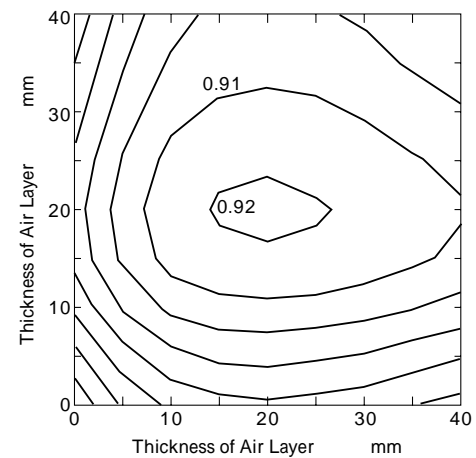
密度勾配型グラスウール層の異なるかさ密度の最適化を検討した結果を第 10 図に示す。グラフの横軸は音源側のグラスウールかさ密度、縦軸は背後側のグラスウールかさ密度を表しており、吸音率の等高線を示している。グラスウールの厚さは音源側および背後側とも 25 mm、表面および背後の空気層厚さは 20mm、多孔板の開口率は 60% である。この結果より、自動車騒音に対しては音源側のグラスウールかさ密度が 32 kg/m^3 で、背後側のグラスウールかさ密度が $48 \sim 64 \text{ kg/m}^3$ であれば良いことがわかる。なお、他の条件が変動してもこの傾向が大きく変わることは認められなかった。また、前面と背後の空気層厚さの最適化について検討した結果を第 11 図に示す。グラスウールは 32 kg/m^3 と 48 kg/m^3 をおのおの 25mm、多孔板の開口率を 60% としている。これらの結果から、明らかに最適値が存在し、前面、背後とも空気層厚さは 20mm 程度が適当であることがわかる。

3.2.4 斜入射吸音率の測定

音響構造の最適化検討結果をふまえて、開発した高架



第10図 グラスウールかさ密度の最適化
Fig. 10 Optimization of bulk density of glass wool layers



第11図 空気層厚さの最適化
Fig. 11 Optimization of thickness of air layers

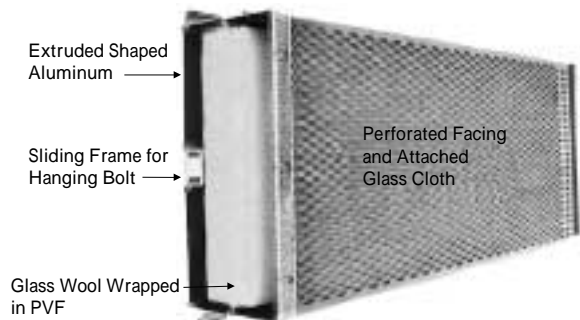


写真1 開発した高架裏面吸音板 (吸音性ダンシェーブ)
Photo 1 Developed sound absorbing panel for elevated road

裏面吸音板を写真 1 に示す。 32 kg/m^3 と 48 kg/m^3 のグラスウールの厚さをそれぞれ 25mm とし、PVF フィルムに包まれ、前面および背後に 20mm の空気層を形成している。さらに、グラスクロスの内貼りした開口率 63% の多孔板で表面を保護している。

自社開発した斜入射吸音率測定システム (OISAC) をもちいて本裏面吸音板の評価をおこなった (写真 2)。第 12 図に示す測定結果より、すべての角度から入射される音に対して優れた吸音性を有していることがわかる。また、同方法による道路交通騒音を考慮した平均斜入射吸音率は 0.93 であり、高架裏面に供される吸音板

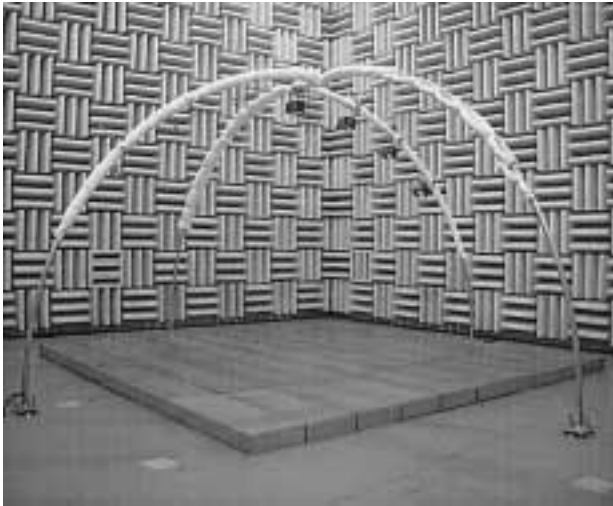
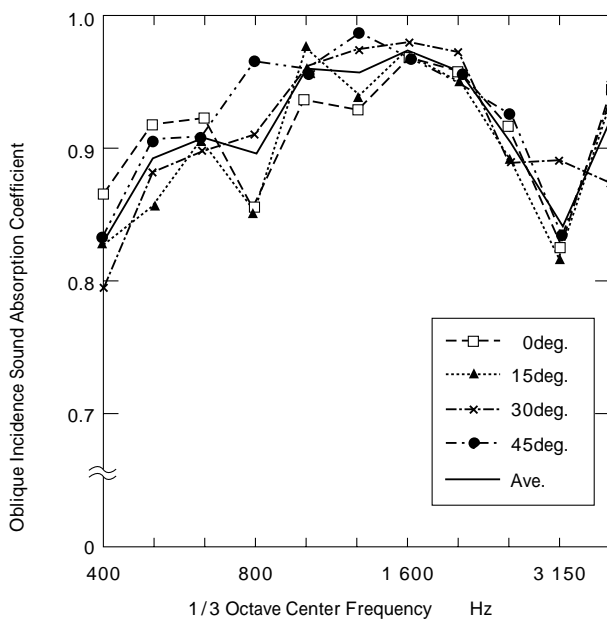


写真2 斜入射吸音率測定状況

Photo 2 View of measurement of oblique incidence sound absorption coefficient



第12図 斜入射吸音率測定結果

Fig. 12 Measured oblique incidence sound absorption coefficient

の基準値である0.90以上を、吸音板厚さ93mmで実現している。

4. 施工例

開発した高架裏面吸音板の施工例を、写真3および写真4に示す。当社の裏面吸音板のこれまでの実績は約70,000m²となっている。



写真3 高架高速道路での施工例

Photo 3 Sound absorbing panel set under elevated road



写真4 鉄道橋での施工例

Photo 4 Sound absorbing panel set under railroad bridge

むすび=境界要素法、一次元伝達マトリックス法をもちいた音響構造の最適化検討により、アルミ押し出し型材をベースにした高性能吸音板を開発し、斜入射吸音率0.93を達成するとともに、制振材料を熱融着することにより、11~14dBの構造物音低減量を達成した。

道路や鉄道橋の2層構造における構造物音と裏面反射音との双方に対して騒音低減効果が大きく、今後、沿道騒音環境の改善の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 田中俊光ほか：日本騒音制御工学会誌，Vol.22，No.4(1998)，p.205.
- 2) 田中俊光ほか：機械学会論文集，50-453(C)1984，p.848.
- 3) 宇津野秀夫ほか：機械学会論文集，56-532(C)1990，p.3248.
- 4) 杉本理恵ほか：機械学会講演論文集，No.97-2(1997)，p.125.
- 5) 杉本理恵ほか：平成9年度日本騒音制御工学会研究発表会講演論文集，(1997)，p.53.