

低層遮音壁の音響性能の測定 第2報

Measurement of Sound Efficiency of Low Noise Barriers No.2

山室成樹*

Shigeki Yamamuro

一般道路周辺での自動車交通騒音対策として低層遮音壁が注目されている。前報では低層遮音壁の音響性能の測定結果を報告した。本報告では、数値解析技術を適用して低層遮音壁の性能を解析し、実験結果と比較したので結果を報告する。

Low noise barrier along urban roads for reducing the road vehicle noise is in the spotlight. In previous paper, author measured the effect of a low noise barrier reducing the noise. In this paper, we analyzed its performance with numerical analysis technique and compared its performance with experimental results, then report results.

1. はじめに

一般道路周辺の騒音対策として低層遮音壁が注目されており、施工も徐々に進められている。前報¹⁾では、高さが1 m程度の低層遮音壁でも、音源が受音点から見えない領域では5 dB程度の騒音低減効果が得られることが実験により確認されたことを報告した。本報では、数値解析技術の一つとして音響解析分野では適用が盛んな境界要素法を用いて、低層遮音壁周辺の音場を2次元問題として取り扱い、その騒音低減効果を計算により求め、計算結果と実験結果を比較し、その解析手法の妥当性を確認できたので以下に報告する。

2. 数値解析について

音響問題を数値解析する手法としては差分法、有限要素法、境界要素法がよく知られている。それぞれ特徴を持つが、境界要素法の特徴は、対象としている事象の次元を一つ下げて考慮すればよいことにある。また、無限に広がる領域を解析するには境界要素法が有利である。これは無限遠方の境界からの音場への寄与はSommerfeldの放射条件²⁾より無視できることが知られているからである。また、遮音壁周辺の音場解析を行う場合、図1のような壁の断面方向を考慮すると、道路交通騒音を線音源、壁は同一断面で無限に続くと思えることができ、対象を2次元問題として取り扱うことができる。また、地面を音響的な完全反射面とすると、鏡像法を適用することで地面を計算対象から除外することが可能で、従って、数値解析を行う対象は、次数を下れば遮音壁の表面のみとなり、少ない計算機資源を有効に利用することができる。

3. 音場の定式化

境界要素法を導入するには、対象としている事象を支配する方程式とその基本解が既知である必要がある。求めたい変数は音圧 p と空気粒子の粒子速度 v であり、これらを速度ポテンシャル ϕ によって与える。 p 、 v 、 ϕ の

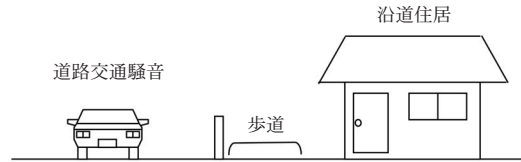


図1(a) 低層遮音壁周辺の断面図
Fig. 1(a) Section of around the low noise barrier

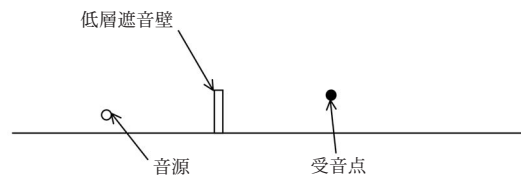


図1(b) 音源、遮音壁、受音点の配置図
Fig. 1(b) Geometry the line source, low noise barrier, and receivers

関係は空気密度 ρ を用いて

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

$$v = - \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2)$$

と表される。まず、音場を支配する方程式は2次元問題の場合、

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3)$$

の波動方程式が知られている。ただし、

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (4)$$

音波が時間的に単弦振動をしていると、その関数形は角振動数を ω として $e^{j\omega t}$ を含み、(3)式は(5)式のように書き換えることができる。 k は波数である。

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (5)$$

* 研究開発センター 技術開発部

これはHelmholtz方程式と呼ばれ、以下の解析の出発点となる方程式である。

(5)式を境界要素法により解析するには、偏微分方程式を積分方程式表示に変換する必要がある。そこで、図2のように音場を仮定し、領域 Ω 、領域の境界を Γ と定義する。 Ω 内には音源 $\mathbf{p}$ と受音点 $\mathbf{r}$ があり、音波を散乱する物体が存在するものとする。散乱体も領域も境界を持つものであり、 $\mathbf{n}$ は境界外向き単位法線ベクトルとする。

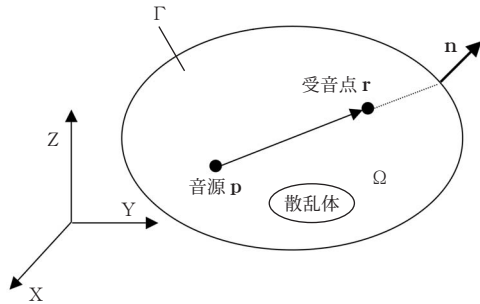


図2 3次元有界閉領域

Fig. 2 Three-Dimensional closed field with finite limit

式(5)を満たす基本解として、関数 ϕ^* を導入する。関数 ϕ^* は領域 Ω 内で連続であり、2階微分可能な関数とする。関数 ϕ と ϕ^* についてグリーンの定理が成り立つ。

$$\int_{\Omega} \{ \phi \nabla^2 \phi^* - \phi^* \nabla^2 \phi \} d\Omega = \int_{\Gamma} \left(\phi \frac{\partial \phi^*}{\partial \mathbf{n}} - \phi^* \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} \right) d\Gamma \quad (6)$$

ここで関数 $\phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r})$ は次の方程式を満足する基本解とする。

$$\nabla^2 \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r}) + k^2 \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r}) + \delta(\mathbf{q}, \mathbf{r}) = 0 \quad (7)$$

ここで δ はDiracのデルタ関数である。(5)～(7)式より受音点での速度ポテンシャル $\phi(\mathbf{r})$ は

$$\phi(\mathbf{r}) = \int_{\Gamma} \left(\phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r}) \frac{\partial \phi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{q})} - \phi(\mathbf{q}) \frac{\partial \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{q})} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) \quad (8)$$

となる。(8)式は、受音点での速度ポテンシャルが領域境界での積分により求められることが特徴である。

(7)式を満足する基本解 $\phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r})$ は、2次元問題の場合、

$$\phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r}) = \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(kR) \quad (9)$$

$$\frac{\partial \phi^*(\mathbf{q}, \mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}(\mathbf{q})} = -\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(kR) \frac{\partial R}{\partial \mathbf{n}} \quad (10)$$

ただし、 $R = |\mathbf{q} - \mathbf{r}|$

ここで、 $H_0^{(2)}$ 、 $H_1^{(2)}$ は0次および1次の第2種ハンケル関数である。なお(9)式はSommerfeldの放射条件を満足している。(9)、(10)式を(8)式に代入すると

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{p} - \mathbf{r}|) \\ &+ \int_{\Gamma} \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) \frac{\partial \phi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{n}} d\Gamma(\mathbf{q}) \\ &+ \int_{\Gamma} \phi(\mathbf{q}) \left(\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) \frac{\partial |\mathbf{q} - \mathbf{r}|}{\partial \mathbf{n}} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) \quad (11) \end{aligned}$$

上式に境界条件として空気のアドミッタンスで基準化した表面音響アドミッタンス β を持つ境界を考慮すると、

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{n}} = -jk\beta\phi(\mathbf{q}) \quad (12)$$

と表わされ、(11)式は

$$\begin{aligned} \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{p} - \mathbf{r}|) \\ &- \int_{\Gamma} \frac{k\beta(\mathbf{q})\phi(\mathbf{q})}{4} H_0^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) d\Gamma(\mathbf{q}) \\ &+ \int_{\Gamma} \phi(\mathbf{q}) \left(\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) \frac{\partial |\mathbf{q} - \mathbf{r}|}{\partial \mathbf{n}} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) \quad (13) \end{aligned}$$

(13)式より境界上の速度ポテンシャルと境界条件が与えられれば、任意の受音点での速度ポテンシャルが求められる。そこで、受音点を境界上に移動させ、境界上の速度ポテンシャルを求める。結果は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} a(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{p} - \mathbf{r}|) \\ &- \int_{\Gamma} \frac{k\beta(\mathbf{q})\phi(\mathbf{q})}{4} H_0^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) d\Gamma(\mathbf{q}) \\ &+ \int_{\Gamma} \phi(\mathbf{q}) \left(\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) \frac{\partial |\mathbf{q} - \mathbf{r}|}{\partial \mathbf{n}} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) \quad (14) \end{aligned}$$

ここで $a(\mathbf{r})$ は点 $\mathbf{r}$ の位置によって

$$a(\mathbf{r}) = \begin{cases} 2\pi & \text{領域内の点} \\ \pi & \text{滑らかな境界上} \\ 0 & \text{領域外の点} \end{cases} \quad (15)$$

となり、対象としている滑らかな境界上では

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{p} - \mathbf{r}|) \\ &- \int_{\Gamma} \frac{k\beta(\mathbf{q})\phi(\mathbf{q})}{4} H_0^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) d\Gamma(\mathbf{q}) \\ &+ \int_{\Gamma} \phi(\mathbf{q}) \left(\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(k|\mathbf{q} - \mathbf{r}|) \frac{\partial |\mathbf{q} - \mathbf{r}|}{\partial \mathbf{n}} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) \quad (16) \end{aligned}$$

上式は領域境界上で成り立つ。この式から未知数である $\phi(\mathbf{q})$ を求める。境界上の $\phi(\mathbf{q})$ が求まれば (13) 式より、領域内点の速度ポテンシャルも求まる。

4. 境界要素法の適用

式 (13)、(16) を具体的に計算するにあたり、図 3 のように境界を要素に分割し離散化する。この要素を境界要素という。境界要素上での未知関数 $\phi(\mathbf{q})$ の設定には様々な手法が開発されているが、今回は最も簡単な一定要素を用いる。

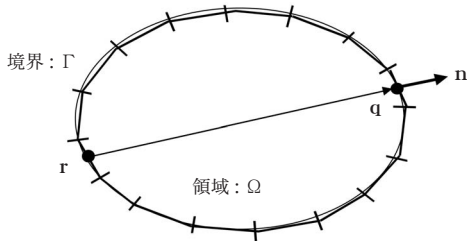


図3 領域境界の要素分割
Fig. 3 Element divided on boundary of field

まず境界 Γ を有限個 (N 個) の境界要素と呼ばれる線分に分割する。(16) 式は有限個の積分の和として表され、一定要素上では音圧も表面アドミタンスも中点である節点の値と同一とみなす。したがって以下の近似が成り立つとする。

$$\begin{aligned}\phi(\mathbf{q}) &\cong \phi(\mathbf{r}_n) \\ \beta(\mathbf{q}) &\cong \beta(\mathbf{r}_n)\end{aligned}\quad (17)$$

(17) 式を用いて (16) 式を離散化すると

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}\phi(\mathbf{r}) &= \frac{1}{4j}H_0^{(2)}(k|\mathbf{p}-\mathbf{r}|) \\ &- \sum_{n=1}^N \phi(\mathbf{r}_n) \int_{\Gamma} \frac{k\beta(\mathbf{r}_n)}{4} H_0^{(2)}(k|\mathbf{q}-\mathbf{r}|) d\Gamma(\mathbf{q}) \\ &+ \sum_{n=1}^N \phi(\mathbf{r}_n) \int_{\Gamma} \left(\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(k|\mathbf{q}-\mathbf{r}|) \frac{\partial |\mathbf{q}-\mathbf{r}|}{\partial n} \right) d\Gamma(\mathbf{q}) \\ &= \phi_d(\mathbf{r}) - \sum_{n=1}^N f_{\Gamma n}(\mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}_n)\end{aligned}\quad (18)$$

ただし

$$\phi_d(\mathbf{r}) = \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k|\mathbf{p}-\mathbf{r}|) \quad (19)$$

$$f_{\Gamma n}(\mathbf{r}) =$$

$$\int_{\Gamma} \frac{k\beta(\mathbf{q}_n)}{4} H_0^{(2)}(k|\mathbf{q}_n-\mathbf{r}|) d\Gamma(\mathbf{q}_n) + \int_{\Gamma} \left(\frac{k}{4j} H_1^{(2)}(k|\mathbf{q}_n-\mathbf{r}|) \frac{\partial |\mathbf{q}_n-\mathbf{r}|}{\partial n} \right) d\Gamma(\mathbf{q}_n) \quad (20)$$

次に受音点 $\mathbf{r}$ が境界上の節点と同一とすると、

$$\frac{1}{2}\phi(\mathbf{r}_m) = \phi_d(\mathbf{r}_m) - \sum_{n=1}^N f_{\Gamma n}(\mathbf{r}_m) \phi(\mathbf{r}_n) \quad (21)$$

さらにマトリクス表記してまとめると

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} + f_{\Gamma 1}(\mathbf{r}_1) & \cdots & f_{\Gamma 1}(\mathbf{r}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{\Gamma 1}(\mathbf{r}_1) & \cdots & \frac{1}{2} + f_{\Gamma 1}(\mathbf{r}_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi(\mathbf{r}_1) \\ \vdots \\ \phi(\mathbf{r}_N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_d(\mathbf{r}_1) \\ \vdots \\ \phi_d(\mathbf{r}_N) \end{bmatrix} \quad (22)$$

未知数と既知数を分離して整理すると

$$\begin{aligned}\Phi_d &= \mathbf{F}\Phi \\ \Phi &= \mathbf{F}^{-1}\Phi_d\end{aligned}\quad (23)$$

となり Φ が求める境界表面の速度ポテンシャルマトリクスである。上式より境界表面の速度ポテンシャルが求まれば、(13) 式も同様の方法で離散化し、 $f_{\Gamma n}(\mathbf{r}_m)$ を計算することにより、領域内部の速度ポテンシャルも計算することができる。

5. 計算結果と実験結果

低層遮音壁の挿入損失を計算により求めるが、音源や受音点の配置は図 4 のように前報の実験に合わせた。

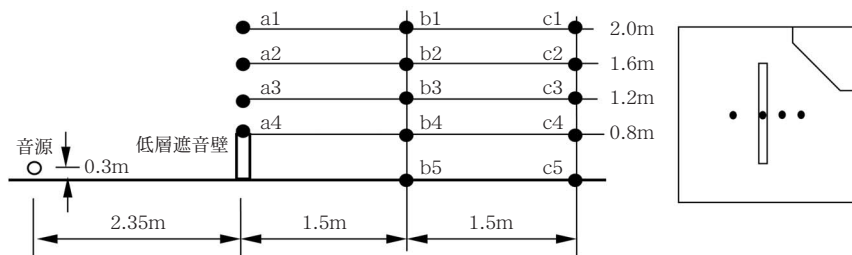


図4 実験および計算における配置
Fig. 4 Geometry of sound source, receiving points and low noise barrier on experiment and analysis

5.1 実験

多次元ホール中央に、低層遮音壁（幅2m×高さ800mm×厚さ120mm）5体を型鋼H-150にて設置し、吸音面側に音源を配置、背面側に受音点を配置し、インパルスレスポンスを測定した。配置図は図4のとおりとする。次に、低層遮音壁を撤去し、ホール内に何も無い状態でのインパルスレスポンスを測定し、両者の差を挿入損失とした。なお、測定波形は時間軸上で壁の側方からの回り込み音到達前までをデータとした。

5.2 計算

実験と同様の音源、受音点、壁の配置を2次元平面内に仮定した。したがって音源は無限長線音源、低層遮音壁は無限長のものを設置したものとする。

床面、低層遮音壁の裏面の表面境界条件は音響的に完全反射面、低層遮音壁の表面境界条件にのみ、実測による平均斜入射吸音率から以下の計算により表面音響インピーダンスを求め、 ρc で基準化した後、逆数をとってアドミッタンス β とした。

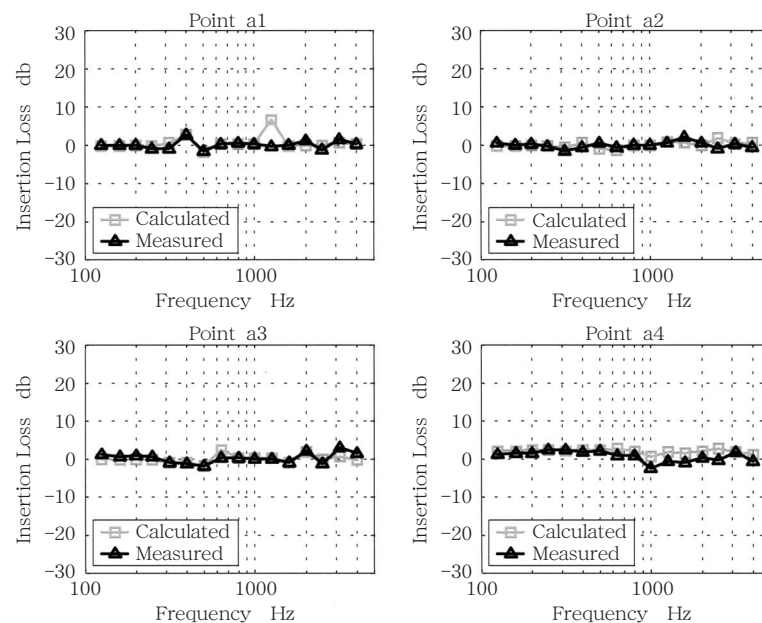


図5 a列における低層遮音壁の実験と計算による挿入損失

Fig. 5 Insertion loss of low noise barrier by measurement and analysis on the line of receiving points a-series

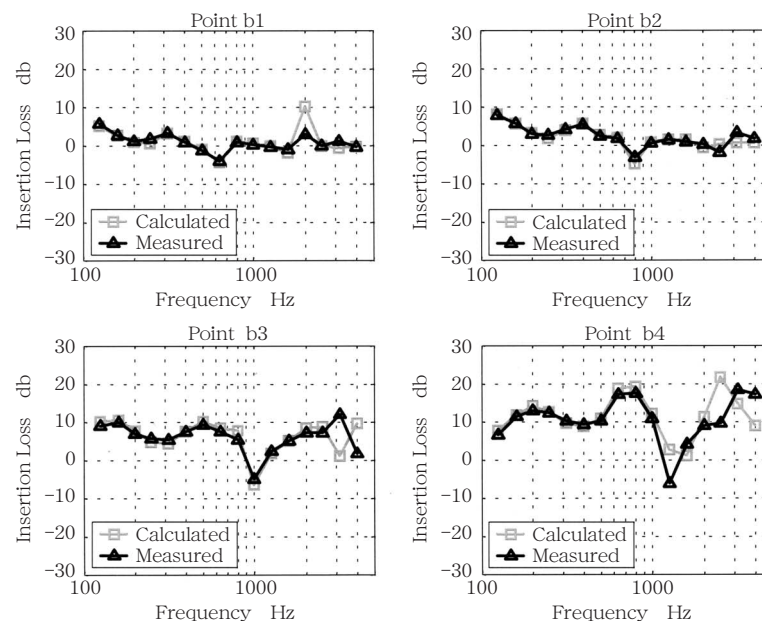


図6 b列における低層遮音壁の実験と計算による挿入損失

Fig. 6 Insertion loss of low noise barrier by measurement and analysis on the line of receiving points b-series

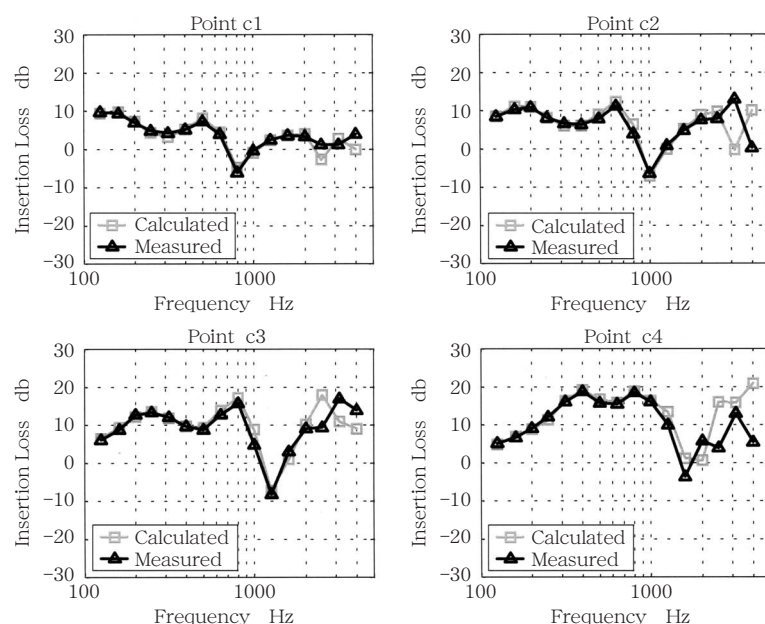


図7 c列における低層遮音壁の実験と計算による挿入損失
Fig. 7 Insertion loss of low noise barrier by measured and analysis on the line of receiving points c-series

$$Z = \frac{1 + \sqrt{1 - a}}{1 + \sqrt{1 - a}} \rho c$$

Z は材料の表面音響インピーダンス

ρc は空気のインピーダンス

a は実測斜入射吸音率

計算周波数は114～4387Hzの1/15オクターブバンドとし、エネルギー合成値を平均して1/3オクターブバンド音圧レベルを求めた。計算でも壁が無いときの音圧レベルを求め、両者の差を挿入損失とした。

なお、挿入損失を求める際には、A特性の補正、道路交通騒音のスペクトルによる補正は行っていない。

結果をa列から順にb列、c列と図5～7に示す。

6. 考察

実験では計測した波形において、低層遮音壁の側方からの回り込み音が到達した時点以降のデータに0を代入している。このことによって、周囲からの反射音等を除去でき、半自由音場内での測定をよく模擬できていると考えられる。これに対して数値計算では、半自由音場内での無限長遮音壁の挿入損失を計算しているので、周囲には音響的な反射体は存在しない。実験は3次元であり、数値計算は2次元なので、厳密には結果を比較することはできないのであるが、実験値と計算値はよく一致していた。遮音壁の挿入損失を求めるには2次元数値計算で代用することが十分可能と考えられる。なお、前報の実験では実際の低層遮音壁を設置した状況を模擬して挿入損失を測定したが、2次元数値解析と比較するのは困難と判断し、今回の報告の対象からは除外した。

7. おわりに

実験により求めた低層遮音壁の挿入損失と、数値計算で得た値とを比較したところ、よく一致した。2次元数値解析手法の妥当性が確認できたので、今後は低層遮音壁などの性能向上に関する設計、現場での騒音低減効果の計算などに適用していきたい。

謝辞

九州芸術工科大学音響設計学科藤原教授には終始、適切な助言を賜った。また、音響設計学科の皆様には貴重な助言を多数頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 山室、山口：低層遮音壁の音響性能の測定，クリモト技報，No.46，2002
- 2) 田中、松本、中村：境界要素法、培風館、1991
- 3) 上坂、大西、木村、鉢嶺：低層遮音壁の設計方法に関する研究、土木研究所資料、第3705号、2000
- 4) 日本音響学会道路交通騒音調査委員会：道路交通騒音の予測モデル、日本音響学会誌、55(4)、pp.281-324、1999
- 5) 前川：建築・環境音響学、共立出版、1990

執筆

山室成樹

Shigeki Yamamuro

昭和63年入社

吸音板の研究・開発に従事



栗本トピックス

農業用開水路の補修への提案・・・《水路更生用FRPM板の紹介》

近年、数十年前に構築されたコンクリート構造物の老朽化が進み、鉄筋の腐食による耐久性の低下などが問題になり、その対策が迫られている。強化プラスチック複合板(以下、FRPM板という)による工法は、老朽化したコンクリート構造の農業用水路の開水路形状(開水路)を更生するもので、既設水路を取り壊すことなく固定金物を用いてFRPM板を取り付け、水路面との隙間にモルタルを充填するものである。

〈特長〉

①工期が短縮できる。

FRPM板は、軽量であるので狭い場所での作業が楽で、また現地での切断や穴開け加工も容易である。

②水理特性がよい。

FRPM板の粗度係数は、既設コンクリート構造物と比較すると小さいので、更生後の粗度が改善され、通水断面が縮小されても既設水路と同流量以上の通水量が得られる。表1に粗度係数を示す。

表1 粗度係数

水路の材料	粗度係数
コンクリート（現場打ちフルームなど）	0.015
強化プラスチック複合材	0.010

③耐食性に優れている。

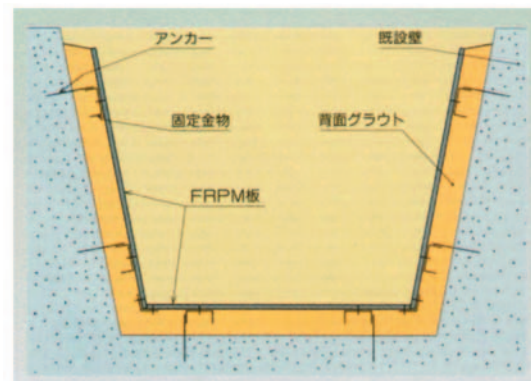
プラスチックの中でも優れた耐食性を有している。

④止水性の向上

FRPM板ライニング工法は、FRPM板及び背面グラウトの二重の止水効果を期待することができる。

⑤産業廃棄物がほとんどでない。

既設コンクリートを利用するため、廃棄コンクリートや残土が発生しない。



〔施工断面図〕

〈施工実績例〉



〔暗渠部〕



〔開渠部〕