

多孔質舗装材の音響モデルに関する研究

川真田智¹・栗木稔²・村瀬正典³・丸山暉彦⁴

¹正会員 工修(株)ブリヂストン研究2部(〒187-8531 東京都小平市小川東町3-1-1)

²正会員 工修(株)ブリヂストン免震・道路資材開発部(〒244-8510 横浜市戸塚区柏尾町1)

³正会員 工修(株)ブリヂストン研究2部(〒187-8531 東京都小平市小川東町3-1-1)

⁴正会員 工博 長岡技術科学大学 環境・建設系(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町)

排水性舗装をはじめとした多孔質舗装材は固い骨格で構成された多孔質構造による特徴的な吸音特性を示す。骨格構造の違いからグラスウール等の繊維系吸音材に用いられてきた音響インピーダンスモデルを多孔質舗装材の音響シミュレーションに適用するのは適切でないため、タイヤ/道路騒音の伝搬シミュレーション等を行う上で適切なモデルが求められている。本報では多孔質舗装材の構造の特徴を直接反映した有限要素法(FEM)の要素モデルを新たに提唱する。また、計算結果と実験結果の比較を行い吸音率、特性インピーダンス、伝搬定数などの音響特性の傾向や特徴を良く表わしていることが確認され、本モデルの妥当性が確認された。

Key Words : *Drainage Pavement, Porous Pavement, Acoustic Impedance, Finite Element Method, Tire/Road Noise*

1. はじめに

沿道環境問題の中でも重要な課題の一つである道路交通騒音は都市部を中心に厳しい状況にあり、早急な対策が求められている。このような状況の中、雨天時の走行安全性だけでなく、交通騒音の低減を目的として排水性舗装を施工する例が急速に増加しつつある。排水性舗装では、密粒度舗装に対して2～5 dB程度の騒音低減効果が確認されている。

排水性舗装をはじめとした多孔質舗装では、空隙が連通性であるため水、空気等の流体を通すという特徴を持っており、音響的には、空隙による吸音性を持ち、これが騒音低減効果に寄与していることは間違いないと考えられる。多孔質舗装はグラスウールなどの繊維系吸音材料とは異なり、固い骨格で構成された多孔質材料とみることができ、その吸音メカニズムは繊維系吸音材料とは大幅に異なる。すなわち、多孔質舗装内部では音波の減衰が低く、干渉によるシャープなピークを示す吸音特性が特徴となっている^{1) 2)}。そのため繊維系吸音材料において従来から用いられているインピーダンス予測モデル(Delany-Bazleyモデル等)を適用することは適当でないと考えられる。一方、固い骨格から構成され

た多孔質材料のモデルとしてAllardモデルがあり、吸音率の予測計算では比較的妥当な値を示すことが報告されている³⁾。しかし、これらのインピーダンスモデルでは任意の状況下においてタイヤ・道路騒音の伝搬等の計算には簡単に適用できないのが難点である。ここでは、多孔質舗装材のタイヤ・道路騒音の伝搬シミュレーションに適用できる様、有限要素法(FEM)の多孔質舗装の要素モデルを提唱し、その妥当性を検討したので以下に報告する。

2. 多孔質舗装材の音響的なモデル定式化

グラスウール等の繊維系吸音材料のモデルとして、Delany-Bazleyモデル⁴⁾(以下DBモデル)やDBモデルを改良した幹モデル⁵⁾がある。これらのモデルの特徴として、空隙率が非常に高く(90%以上)、空隙が微細構造をとり内部の減衰により吸音性を発揮する繊維系の吸音材料では比較的良好な適合性を持っている。

一方、多孔質舗装では、内部減衰による吸音と言うより材料表面での干渉によるピークを持った吸音特性となることが知られている^{1) 2)}。そのため、DBモデルは多孔質舗装材に適用し難いという結果

が発表されている¹⁾。また、固い骨格の多孔質材料を管状の空隙を想定した理論計算から求められたAllardモデルは、モデル構築上の理論は整然としており、比較的良好な適合性が確認されている³⁾。しかし、伝搬計算にはモデルにより算出された表面インピーダンスを用いることが一般的に行われており、舗装材内部での音波の伝搬及び舗装材表面における干渉現象^{1) 2)}を直接捉えていない点に難があると考えられる。

多孔質舗装内部では、音波が伝搬する部分は空隙の一部であり、空隙の大きさに応じて管壁での粘性減衰を受けるため音波も減衰していくと考えられる。ここでは、構造の特徴を直接反映させるため、

- A) 舗装材内部の一部において音波の伝搬・減衰が発生する
- B) 減衰は舗装材内部で一様に受ける
- C) 空隙構造の複雑さは音波の伝搬速度（音速）に反映する

という考え方を取り入れたFEMの要素モデルを考えることとした。モデルパラメータとしては、

- ① 舗装材内部の空隙の内、実際に音波が伝搬できる領域の、全体の体積に対する比率を示す有効空隙率（ Ω ）
- ② 舗装材内部における単位長あたりの音波の減衰量を示す伝搬抵抗（ R ）
- ③ 舗装材内部の音波の伝搬速度（ C_a ）（空隙構造の複雑さを示す）

の3個を用いる。

空気中における定常状態での音波の伝搬は式(1)のHelmholtzの方程式で示される。

$$\nabla^2 P + k^2 P = 0 \quad (1)$$

P : 音圧 k : 波数(= ω/C) ω : 角振動数
 C : 音速

一方、多孔質舗装材中では式(2)に示す様に、伝搬抵抗 R により音波は粒子速度に比例して一様に減衰すると考える。

$$\nabla P = iR V \quad (2)$$

V : 粒子速度 R : 伝搬抵抗

多孔質舗装材中における定常状態での運動方程式は運動エネルギーと減衰項により式(3)の様に示され、式(3)及び連続の式である式(4)より多孔質舗装材内の音圧は式(5)の様に示される。

$$\nabla P = (j\rho\omega + R)V \quad (3)$$

ρ : 密度

$$j\omega P = \rho C_a^2 \text{div}(V) \Rightarrow \text{div}(V) = \frac{j\omega}{\rho C_a^2} P \quad (4)$$

C_a : 多孔質舗装内音速

$$\nabla^2 P = \left(j \frac{\omega R}{\rho C_a^2} - \frac{\omega^2}{C_a^2} \right) P \quad (5)$$

境界条件を式(6)～(8)に示すように設定し、Galarkin法による離散化を考える⁶⁾。

$$P = \bar{P} \quad \text{on} \quad S_1 \text{ (音圧固定境界)} \quad (6)$$

$$V_n = \bar{V}_n \quad \text{on} \quad S_2 \text{ (法線方向粒子速度固定境界)} \quad (7)$$

$$\frac{V_n}{P} = A_n \quad \text{on} \quad S_3 \text{ (アドミッタンス固定境界)} \quad (8)$$

V_n : 法線方向粒子速度 A_n : アドミッタンス

要素領域に対して、式(9)の様に形状関数を選び式(1)及び式(5)を離散化すると、空気中では式(10)、多孔質舗装材中では式(11)のようになる⁴⁾。

$$P = \sum_i N_i P_i \quad (9)$$

P_i : 各節点の音圧 N_i : 節点 i に対応する形状関数

$$([K] + j\rho\omega[C] - \omega^2[M])P = j\rho\omega[F] \quad (10)$$

$$([K] - \omega^2[M] + j\omega \frac{R}{\rho}[M])P = (j\rho\omega + R)[F] \quad (11)$$

$$K_{ij} = \iiint \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (12)$$

$$M_{ij} = \frac{1}{c^2} \iiint N_i N_j dx dy dz \quad (13)$$

$$C_{ij} = \iint_{S_3} A_n N_i N_j dS \quad (14)$$

$$F_i = \iint_{S_2} \bar{V}_n N_i dS \quad (15)$$

$$I_2 = \iint f(\varepsilon, \xi) d\varepsilon d\xi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_i H_j f(\varepsilon_i, \xi_j) \quad (16)$$

$$I_3 = \iiint f(\varepsilon, \xi, \eta) d\varepsilon d\xi d\eta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n H_i H_j H_k f(\varepsilon_i, \xi_j, \eta_k) \quad (17)$$

H : 重み

各面積分は式(16)、各体積積分は式(17)の様にGaussの求積法により求められる。

ここで、多孔質舗装材の[K]及び[M]マトリクス各成分の積分範囲を限定することで多孔質舗装材中の一部でのみ音波の伝搬が起こるということを表現することができる。具体的には多孔質舗装材中で積分を計算する際、式(18)(19)の様に有効空隙率（ Ω ）を掛けることで表現される。

$$I_2 = \Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n H_i H_j f(\varepsilon_i, \xi_j) \quad (18)$$

$$I_3 = \Omega \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n H_i H_j H_k f(\varepsilon_i, \xi_j, \eta_k) \quad (19)$$

Ω : 有効空隙率

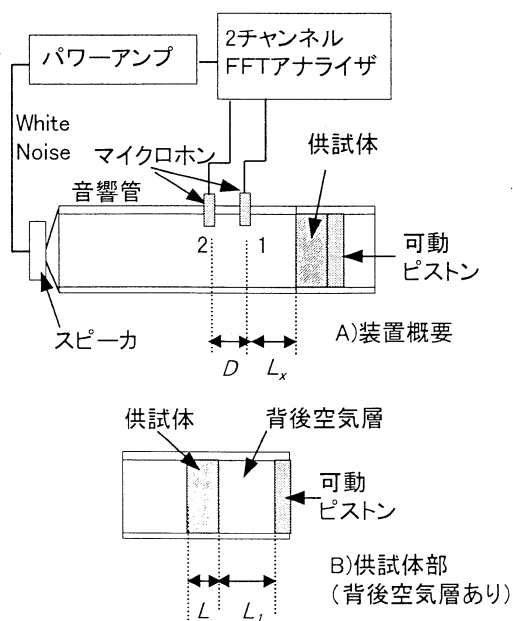
3. 実験結果によるモデル妥当性の検討

(1) 垂直入射吸音率（管内法）

表—1 に示す $\phi 100 \times 30\text{mm}$ の供試体を樹脂バイндаを用いて作製した。供試体の空隙率はノギス法により求めた。空気の流れ抵抗はDC法⁷⁾により測定し、表—1 には流速0.05m/sでの流れ抵抗を示す。

表—1 供試体（垂直入射吸音率）

供試体	最大粒径 (mm)	空隙率	流れ抵抗 (Pa·s/m ²)	備考
1	2.50	0.334	10133	3号珪砂
2	1.25	0.274	62533	4号珪砂
3	13.0	0.234	2500	6号碎石 排水性舗装



図—1 2マイクロホン法測定装置概要

吸音率、ノーマルインピーダンスは2マイクロホン法により測定した^{1) 2)}。測定装置の概要を図—1 に示す。供試体は音響管内に密閉され、供試体に対向するスピーカからホワイトノイズを放射した状態で管内の音圧を2本のマイクで測定し、FFTアナライザにより各音圧間の伝達関数 H を求める。求められた伝達関数 H から式(20)よりノーマルインピーダンス、式(21)より吸音率を求めた¹⁾。

また、可動ピストンを移動し供試体の背後に空気層を設けた場合（厚さ2種類、 L_1 及び L_2 ）のノーマルインピーダンスを測定し式(22)より特性インピーダンスを、式(23)より伝搬定数を求め、ここから位相速度（伝搬速度に相当）を求めた⁸⁾。

$$Z = jZ_0 \frac{-H \sin(kL_x) + \sin(k(L_x + D))}{H \cos(kL_x) - \cos(k(L_x + D))} \quad (20)$$

Z : ノーマルインピーダンス

Z_0 : 空気特性インピーダンス

H : マイク1～2伝達関数

L_x : 供試体からマイク1までの距離

D : マイク1～2距離

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \right|^2 \quad (21)$$

α : 吸音率

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 (Z_{a1} - Z_{a2}) - Z_{a1} Z_{a2} (Z_1 - Z_2)}{(Z_{a1} - Z_{a2}) - (Z_1 - Z_2)}} \quad (22)$$

Z_c : 特性インピーダンス

Z_1 : 背後空気層厚さ L_1 の時の
ノーマルインピーダンス

Z_2 : 背後空気層厚さ L_2 の時の
ノーマルインピーダンス

Z_{a1} : 背後空気層厚さ L_1 自体の
特性インピーダンス ($= -jZ_0 \cot(kL_1)$)

Z_{a2} : 背後空気層厚さ L_2 自体の
特性インピーダンス ($= -jZ_0 \cot(kL_2)$)

$$\gamma = \frac{1}{2jL} \ln \left(\frac{(Z_1 + Z_c)(Z_{a1} - Z_c)}{(Z_1 - Z_c)(Z_{a1} + Z_c)} \right) \quad (23)$$

γ : 伝搬定数 L : 供試体厚さ

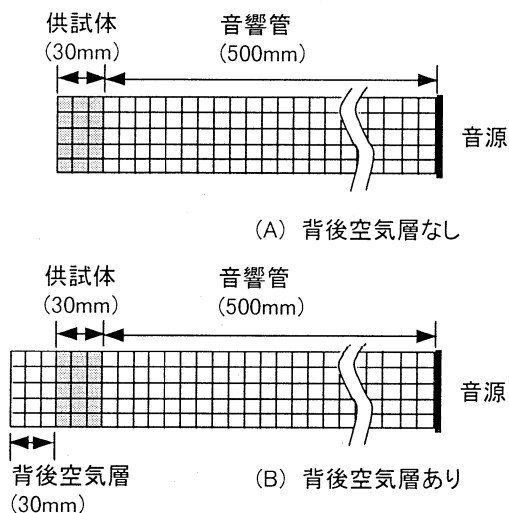
$$\gamma = \alpha + \frac{j\omega}{C_m} \quad \alpha: \text{減衰定数}$$

C_m : 位相速度

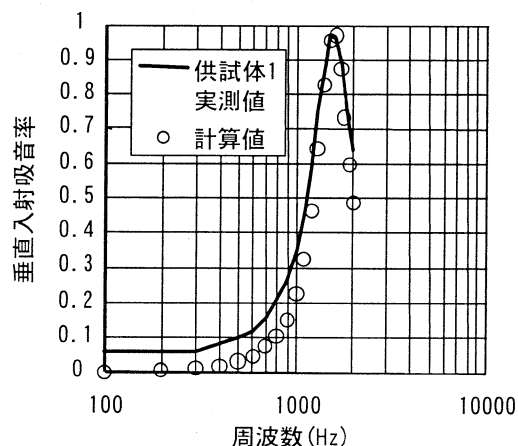
次に、音響管のモデル（図一２）を作成して前述の要素モデルを適用し管内の音圧を計算し、垂直入射吸音率を求めた。その際、供試体に対面する音響管端部断面での粒子速度（ V_p ）を境界条件として与え単一周波数（純音）の音源とし、100～2000Hzの範囲で100Hz毎に計算を行った。モデルパラメータである伝搬速度（ C_a ）は実測の位相速度から求め、有効空隙率（ Ω ），伝搬抵抗（ R ）は計算結果と実測値が適合するように探査した。表一２には、モデルパラメータ（有効空隙率，伝搬抵抗，伝搬速度）を，図一３～５にはその時の垂直入射吸音率（実測及び計算値）を示す。表一２のパラメータを用いて、実測と同じ背後空気層を設けた場合の管内の音圧を計算しノーマルインピーダンスを求め，式(22)(23)より特性インピーダンス及び伝搬定数を求めた結果を実測値（実線）とともに図一６～１１に示す。

表一２ モデルパラメータ

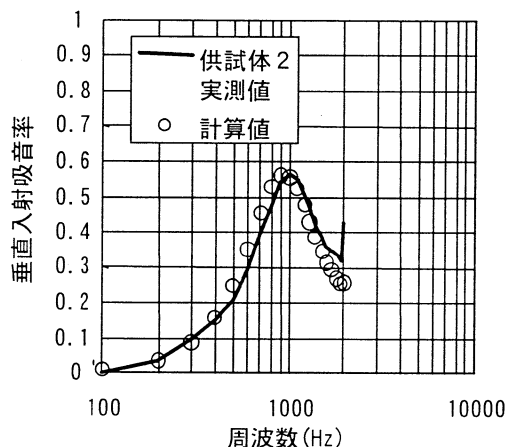
供試体	有効空隙率 (Ω)	伝搬抵抗 $R(\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$	伝搬速度 $C_a(\text{m/s})$
1	0.12	2500	183
2	0.05	7000	110
3	0.07	1000	145



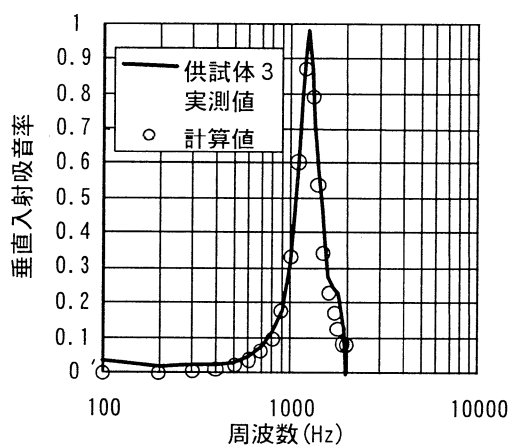
図一２ 音響管モデルメッシュ図



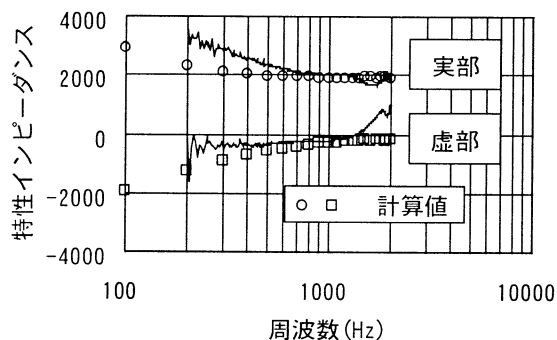
図一３ 垂直入射吸音率（供試体１）



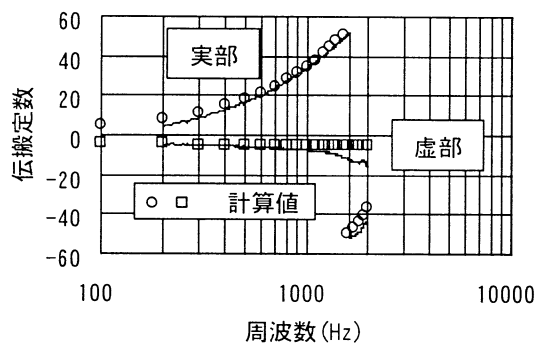
図一４ 垂直入射吸音率（供試体２）



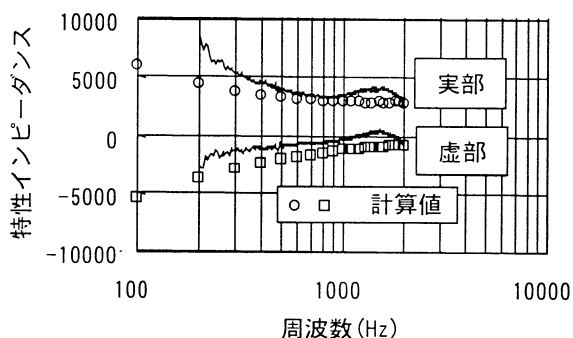
図一５ 垂直入射吸音率（供試体３）



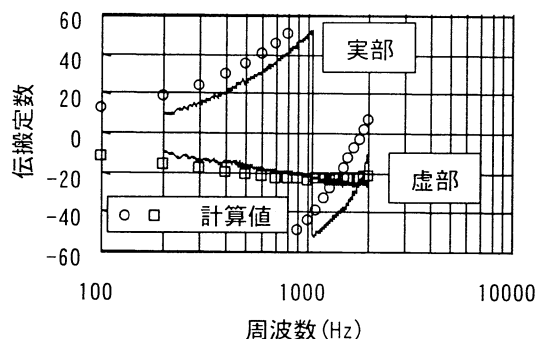
図一６ 特性インピーダンス（供試体１）



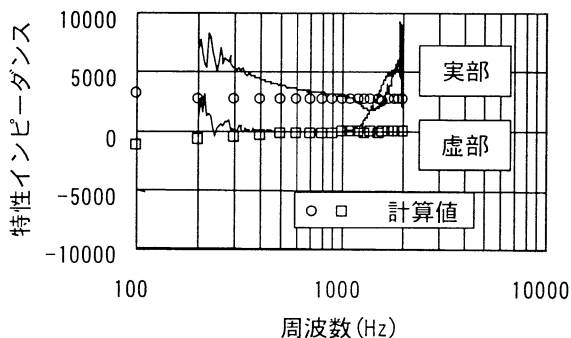
図一 7 伝搬定数 (供試体 1)



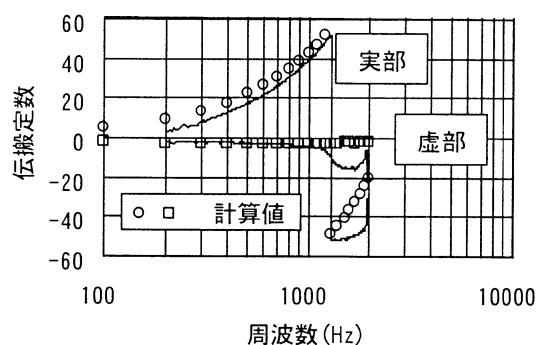
図一 8 特性インピーダンス (供試体 2)



図一 9 伝搬定数 (供試体 2)



図一 10 特性インピーダンス (供試体 3)

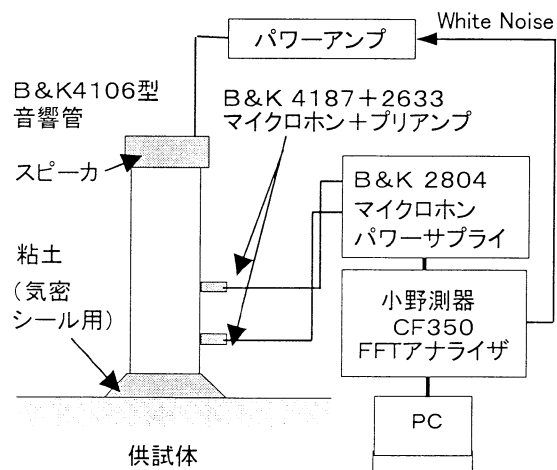


図一 11 伝搬定数 (供試体 3)

垂直入射吸音率及び特性インピーダンスともに実測とかなり良く合致していることがわかる。モデルパラメータの有効空隙率は供試体の空隙率に比べかなり低い値となり、音波の伝搬に寄与できる空隙は多孔質舗装材内の空隙の中でも限られたものであることを示唆している。また、モデルの伝搬抵抗はDC法で測定した流れ抵抗に対してかなり低いものとなるが、伝搬定数の虚部（減衰定数に相当し、音波の減衰の程度を示す）が計算値及び実測値で近い値を示していることから、単純にDC法の流れ抵抗をもって多孔質舗装材料内部の減衰を評価することは適切でないことを示唆している。DC法の流れ抵抗は空気の定常流状態での単位長当りの差圧を示すもので⁷⁾、単位は同じではあるが単位長当りの音波の減衰を示す伝搬抵抗とは隔たりがあって当然と考えられる。

(2) 現場吸音率測定法²⁾

前章と同一混合物で300×300×30mmの矩形供試体を作成し、図一 12 に示す様に供試体中央部に音響管を立てて垂直入射吸音率を2マイクロホン法により測定した²⁾。本測定方法を現場吸音率測定法と呼ぶ。



図一 12 現場吸音率測定法

次に音響管、供試体及び外部空間をモデル化し実測と同じ状態をシミュレートするモデルを作成しFEMによる計算を行い、垂直入射吸音率を求めた。

音源は管内法と同様に供試体に対面する音響管端面断面での粒子速度 (V) を境界条件として与え単一周波数（純音）の音源とし、100～2000Hzの範囲で100Hz毎に計算を行った。外部空間は600×600×200（幅×長さ×高さ）の空気とし、その境界は無反射となるように設定した。モデル概要を図-13、計算結果（音圧分布）の一例を図-14（供試体3、1300Hz）に、吸音率の計算及び実測結果の比較を図-15～17に示す。なお、計算に用いたパラメータは供試体のばらつきから、管内法のものから一部修正を行ったため表-3に示す。

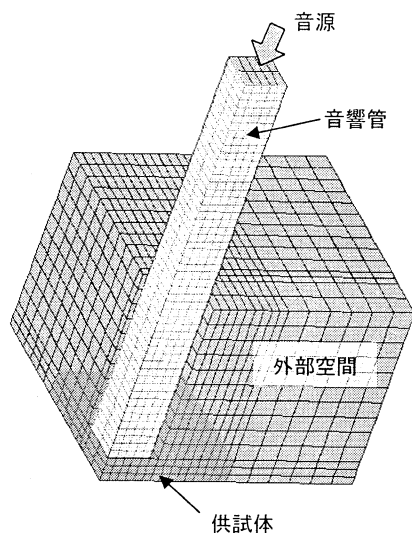


図-13 現場吸音率測定計算モデル概要

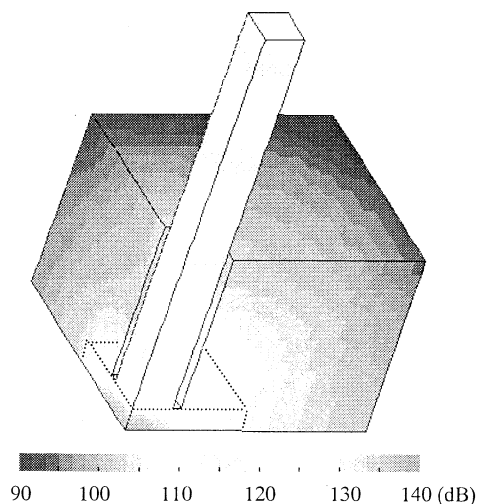


図-14 現場吸音率測定計算結果例
（音圧分布，供試体3，1300Hz）

表-3 モデルパラメータ（現場吸音率測定法）

供試体	有効空隙率	伝搬抵抗 $R(\text{Pas/m}^2)$	音速 $C_a(\text{m/s})$
1	0.12	2500	183
2	0.08	7000	110
3	0.05	1000	145

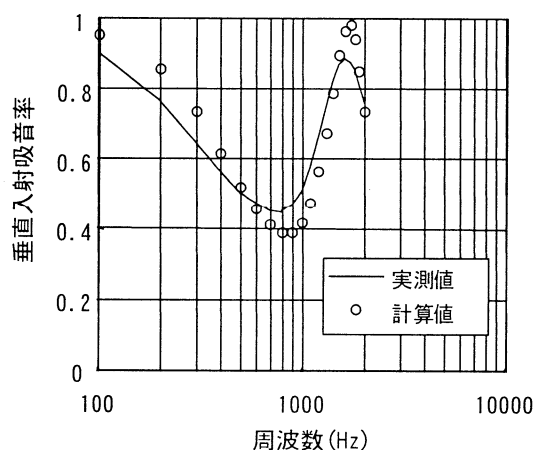


図-15 現場吸音率（供試体1，実測と計算値）

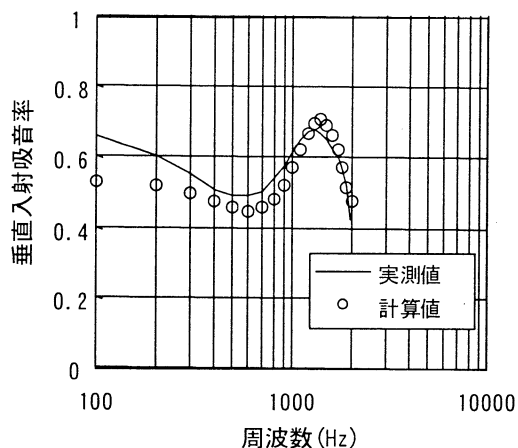


図-16 現場吸音率（供試体2，実測と計算値）

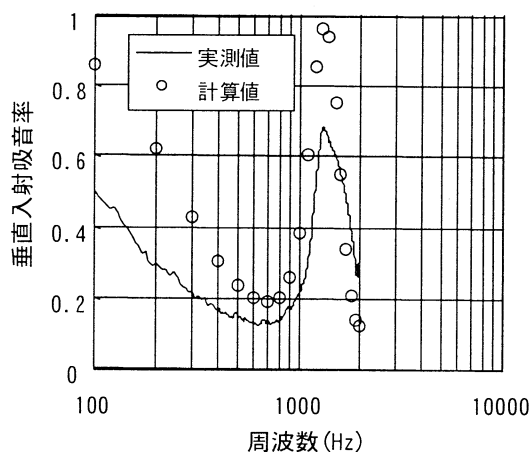
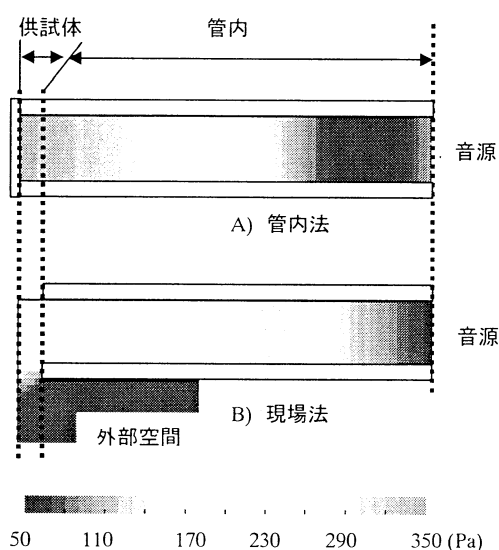
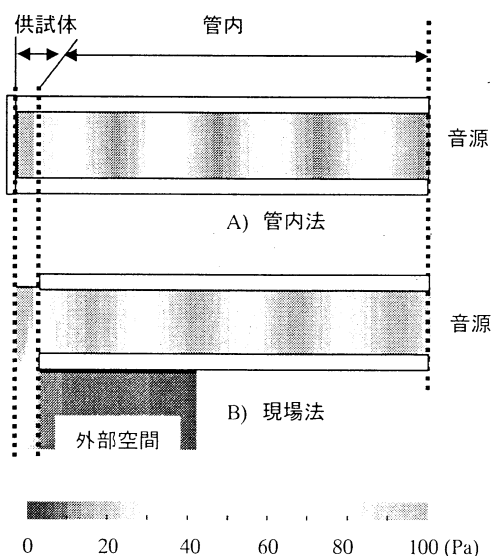


図-17 現場吸音率（供試体3，実測と計算値）

図一15～17より、現場吸音率測定法の実測及び計算値はかなりよく合致していることがわかる。図一14より、供試体供試体外部へ音波が放射されていることがわかるが、そのため管内法で測定された吸音率と比べ異なる傾向を示すものと考えられる。200Hz及びピーク吸音率を示す1300Hzでの音響管内の音圧（供試体3，FEM計算値）を図一18，19に、供試体表面での反射成分音圧の周波数特性（供試体3，FEM計算値）を図一20に示す。現場法では管内法に比べ低周波領域で吸音率が增大しているが、図一18より、現場法では管内法より供試体表面付近での音圧が低いことが確認され、管外へ音波が漏れるため音圧が低下するものと考えられる。

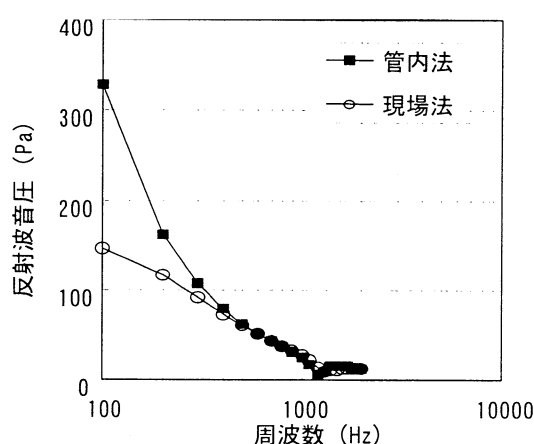


図一18 管内音圧分布
(FEM計算値，供試体3，200Hz)



図一19 管内音圧分布
(FEM計算値，供試体3，200Hz)

また、図一20から現場法では管内法に比べ500Hz以下の反射音成分が低くなっており、管外へ音波が漏れていることがわかる。以上より低周波での吸音率の増大は500Hz以下で見られる音波の漏洩が原因であることがわかる。また吸音率がピークを示す1300Hz（図一19）の管内法の場合、供試体内部の音圧が管内に比べ非常に高くなり、管内の音圧が低くなっていることがわかる。現場法においても管直下の供試体内音圧が管内に比べ高く傾向は管内法と類似しているが、音波の一部は拡散しており、これが管内法との吸音率ピーク付近での測定結果の相違の原因になっていると考えられる。



図一20 供試体表面反射波音圧
(FEM計算値，供試体3)

4. おわりに

排水性舗装をはじめとした多孔質舗装は固い構造と空隙により構成された多孔質材料であるとみることができ、内部では音波の減衰が低く、干渉によるシャープなピークを示す吸音特性が特徴である。ここでは、構造の特徴を直接反映させるため、

- A) 舗装材内部の一部において音波の伝搬・減衰が発生する
- B) 減衰は一様に受ける
- C) 空隙構造の複雑さは音波の伝搬速度（音速）に反映する

という考え方を取り入れ、パラメータとして、

- ① 舗装材内部の空隙の内、実際に音波が伝搬できる領域の、全体の体積に対する比率を示す有効空隙率（ Ω ）
- ② 舗装材内部における単位長あたりの音波の減衰量を示す伝搬抵抗（ R ）
- ③ 空隙構造の複雑さを示す、舗装材内部の音波の伝搬速度（ C_0 ）

を用いた有限要素法（F E M）の多孔質舗装の要素モデルを提唱した。次にこのモデルの妥当性を管内法及び現場吸音率測定法の実測結果により評価した。結果として本方法による計算結果は吸音率及び特性インピーダンスの全体的な傾向，特徴を良く表しており，ここで用いたモデルの妥当性が示された。一方，モデルパラメータの有効空隙率，伝搬抵抗は従来の手法（空隙率，DC法流れ抵抗）で測定された値を用いることが適切でないことが判明したため，対象とする多孔質舗装材の吸音率，特性インピーダンスを予め実測し，実測値に合わせる形でパラメータを調整，決定する必要がある。ここで用いた手法を活用していくには，今後，パラメータのデータベース化が必要になると思われる。

参考文献

- 1) Yamaguchi, M., Nakagawa, H., Mizuno, T. :Sound Absorption Mechanism of Porous Asphalt Pavement, *Journal of the Acoustic Society of Japan(E)*, Vol.20, No.1, Jan. 1999
- 2) 川真田智, 山口道征, 水野卓哉: 排水性舗装の吸音特性と測定手法, 舗装, Vol.33, No.11, 1998年11月
- 3) Hatanaka, H., Yamamoto, K., Measurement and Analysis of Acoustical Properties of Drainage Asphalt, *Journal of the Acoustic Society of Japan(E)*, Vol.20, No.1, Jan. 1999
- 4) M.E.Delany, E.N.Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl. Acoust.* 3, 105-116 (1970)
- 5) Y.Miki, Acoustical properties of porous materials – Modification of Delany-Bazley models, *Journal of the Acoustic Society of Japan(E)*, Vol.11, 15-24 (1990)
- 6) ツィエンキーヴィッツ, O. C. : マトリクス有限要素法, 吉識雅夫, 山田嘉昭監訳, 培風館, 1984.
- 7) ISO9053, Determination of airflow resistance
- 8) Utsuno, H., Tanaka, T., Fujikawa, T.: Transfer Function Method for Measuring Characteristic Impedance and Propagation Constant of Porous Materials, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol. 86, pp637-643, 1989

STUDY ON THE ACOUSTICAL MODEL OF POROUS PAVEMENT

Satoru KAWAMATA, Minoru KURIKI, Masanori MURASE
and Teruhiko MARUYAMA

The acoustical properties and model of porous pavement is discussed in this study. The acoustical properties of porous pavement are quite different from that of the sound absorbing material such as glass wool and urethane foam because of the structure. The acoustical model, acoustic impedance model, used for the sound absorbing material is not suitable for porous pavement. The acoustic model for calculation of sound propagation on porous pavement is newly developed in this study. This acoustic model is the element model of the Finite Element Method based on the structure and acoustical properties of porous pavement. It is shown that this model gives a good fitting to measured acoustical properties and applicable to calculate sound propagation on porous pavement.