

## ◆ 道路特集 ◆

## 多孔質弾性舗装の開発

小林 保\* 近藤 升\*\* 佐々木巖\*\*\* 池原圭一\*\*\*\* 安藤和彦\*\*\*\*\* 久保和幸\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

大都市の一般道路の沿道では自動車騒音が大きな問題となっている。しかし、高速道路と違い一般道路では沿道との出入りの妨げとなるため、遮音壁を設置することは難しい。

このような中で、雨の日の交通安全を目的として開発された排水性舗装が騒音低減効果を持つことがわかり、場所を選ばない騒音対策として注目されている。排水性舗装は車種や走行速度によって一様ではないが概ね 3dB 程度の騒音低減効果<sup>1)</sup>がある。筆者らは、さらに大きな騒音低減効果がある多孔質弾性舗装について研究している。多孔質弾性舗装もまた、排水性舗装と同様に車種や走行速度によって一様ではないが、概ね 10dB 程度の騒音低減効果が期待できるものである。

### 2. 多孔質弾性舗装の着想

低騒音舗装が騒音を低減する機構は「路面が平滑なこと」、「空気を逃がすこと」、「路面に弾力があること」、「音を吸収すること」の 4 つに整理される<sup>1)</sup>。

「路面が平滑」であれば、タイヤと路面の摩擦音、路面の凹凸によるタイヤ加振音の発生が抑制される。小粒径の骨材を用いて舗装表面の粗さを抑えたり、舗装表面を精度よく仕上げれば路面が平滑になる。また、「空気を逃がす」ことにより、タイヤと路面の間に挟まれる空気の圧縮膨張により生じるエアポンピング音を低減する。空気を逃がすには、舗装に空隙を持たせるか、舗装表面に細かい溝やくぼみを作る。「空気を逃がす」舗装構造にすると「路面が平滑」でなくなるので、ふたつの機構の兼ね合いに注意する必要がある。

「路面に弾力」があれば走行による衝撃を吸収し、路面の凹凸によるタイヤ加振音を低減させる。骨材に弾性材料を使用することにより、舗装に弾力性を持たせることができる。

発生した騒音が伝搬の過程において路面で反射  
Development of Porous Elastic Pavement

する時、路面に「音を吸収」させることにより、騒音を低減させる。駆動機関は自動車の底部に取り付けられているので、底部から路面に向かって放射される音の割合が大きい。その音を吸収できれば、騒音低減効果も大きい。

排水性舗装は上記 4 つの機構の内、その空隙による「空気を逃がす」と「音を吸収する」の 2 つの機構が働き、騒音を低減する。一方、多孔質弾性舗装は、排水性舗装の碎石をゴム小片に置き換えたもので、排水性舗装の持つ 2 つの機構に加えて、「路面に弾力がある」機構も働くため更に大きな騒音低減効果が期待できるという着想である。

この着想はゴルフ場等の歩道舗装と似ている。ゴルフ場の歩道舗装はスパイクでも快適に歩けるように、ゴム小片を合成樹脂で固めた多孔質で弾性がある表層が使われている。これを車道舗装として使えるように改良を考えたのが発端である。

### 3. 研究着手時の検討

#### 3.1 研究開始時の課題

多孔質弾性舗装は既存の舗装とは全く異質のものであり、通常の舗装と同様に評価するのが難しい。そのため、当初は評価基準が無くてもできる限り安全性、耐久性が高いものとした。さらに目標は排水性舗装の倍以上の騒音低減効果とした。

#### 3.2 工場製作の表層版

多孔質弾性舗装の表層版の製作は、工場製作方式と現場施工方式の 2 方式が当初考えられた。工場製作方式の表層版は、工場でゴムとのなじみが良いウレタン樹脂とゴム小片を練り混ぜ、プレス加工して版状に成形し、現場で基層に接着する。一方、現場施工方式は現場でゴム小片をウレタン樹脂で練り混ぜ、基層の上に敷き均し、人力によりコテで仕上げるか、転圧機械で仕上げる。この場合、表層の成形と基層への接着が同時にできる利点がある。しかしプレス加工する工場製作方式は、現場施工方式と比べて強度が大きく空隙

率も管理しやすいことから工場製作方式を選択した。

表層版の大きさは、人力施工のためあまり大きくなき方がよく、初め  $1m \times 1m \times 5cm$  を暫定規格とした。5cm の厚さは通常の排水性舗装と同じである。表層版の単位体積重量は、およそ  $0.7g/cm^3$  であるので暫定規格の版 1 枚の重量は約 35kg である。

ゴム小片は廃タイヤを碎いて製造し、その形状は、粒状とひじき状の 2 種類が考えられた。粒状は普通の碎石と同様の形状で、縦横の長さは概ね同じである。ひじき状は太さ 1mm 程度、長さ 1cm 程度の細長い形状である。ひじき状のゴム小片を用いた表層版は、粒状のものよりも引張強度が大きかったためひじき状を選択した。

### 3.3 表層版の基層への固定

多孔質弹性舗装の表層版は軽いので、表層版を路盤の上に並べただけでは表層版が動いてしまう。そこで、或る程度の重量のある基層を設け、これに表層版を固定する必要がある。表層版と基層の固定には、湿気硬化型の接着剤である一液型ウレタン樹脂を用いることにした。

### 3.4 基層の設計

供用中の道路の交通騒音が問題となり、騒音対策が求められる場合を想定すると、多孔質弹性舗装は既設舗装を打ち換えて設置される。従って、多孔質弹性舗装の基層は、舗装打ち換えに適していなければならない。

アスファルト舗装は切削及び敷設が簡単なことと、養生が必要なく施工直後に供用できることから最も打ち換えに適している。しかしアスファルト舗装を基層とする場合、アスファルトが油分を含んでいるため、適合する接着剤は特殊で高価なものとなる。

コンクリート舗装を基層とした場合、接着剤の使用については特段の問題がないが敷設に必要な施工機械が大規模であり、基層の厚さも 20cm 程度以上が必要なため、舗装打ち換えに適さない。

半たわみ性舗装は空隙の大きい開粒度タイプのアスファルト混合物に、セメントミルクを浸透させたものであり、コンクリート舗装と同様に接着剤となじみが良く、コンクリート舗装よりも舗装打ち換えに適している。

よって、半たわみ性舗装を基層として選定した。

## 4. 研究結果およびそれに基づく対応

### 4.1 騒音低減効果

多孔質弹性舗装の表層版厚は、研究当初は 5cm としていたが、騒音低減効果が低下しないならば薄くし、軽量化による施工性の向上と材料の縮減による経済性の向上を図るべきである。

土木研究所試験走路に、厚さを 2cm、3cm、4cm、5cm、空隙率を 30%、35%、40%、さらにひじき状のゴム小片の大きさを変えた表層版を敷設し、騒音を測定した。その結果、最も騒音低減効果のあった空隙率 40%、厚さ 3cm、小さいゴム小片の場合、密粒度アスファルト舗装と比べた騒音低減量は、60km/h で乗用車は 18dB 程度、大型車は 8dB 程度、80km/h では乗用車が 18dB 程度、大型車が 10dB 程度であった<sup>2)</sup>。また、走行速度が高い方が騒音低減効果が大きく、大型車より小型車の方が騒音低減効果が大きかった。これは、乗用車の方が大型車より、高速の方が低速より騒音に占めるタイヤ音の寄与率が高いためである<sup>3)</sup>。厚さ 3cm の表層版の騒音低減効果が他と比べて大きかった理由は、自動車騒音のピーク周波数と厚さ 3cm の表層版の吸音率のピーク周波数が重なるためである。よって、厚さ 3cm を標準仕様とすべきであると考えている。

### 4.2 表層版の基層への固定の再検討

研究当初は表層と基層の接着には一液型のウレタン樹脂を用いていたが、平成 8 年の試験走路で施工後、接着剤の硬化を待って大型トラックが走行した時に、一部表層が基層から剥がれてしまった。このため、表層版の基層への固定について再検討の必要が生じた。

図-1、図-2 は接着剤を用いない方法について検討したものである。図-1 左のように基層にあらかじめボルトを埋め込み、表層版にあけた孔を通して上からナットで締め付ける方法は舗装表面にボルトの頭部が突起し、タイヤに衝撃が加わり危険である。図-1 右のようにボルトの上に皿孔を設置すれば突起はなくなるが、表層版が弾力を持ちかなり変形するため、やはりボルトにタイヤが当たった時に危険となる。

図-2 のように表層版底面と基層の上面に凹凸を設け、表層と基層をかみ合わせる方法は、凹凸を精度良く施工しなければならない。表層版は工場

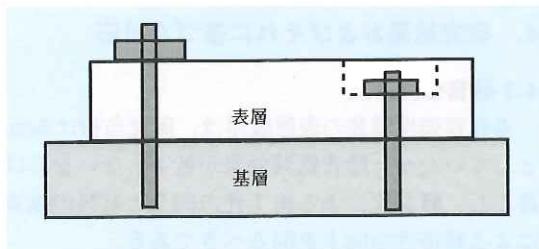


図-1 ボルトによる固定

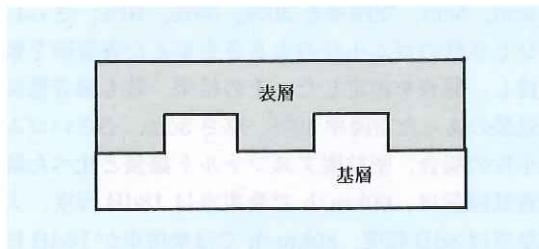


図-2 表層と基層のかみ合わせ

製品であるが、現場施工で行う基層については難しいと考えられる。さらに、図-1 や図-2 の方法は固定する力がボルト位置やかみ合わせ前面に集中するので、表層版が局部的に破壊される恐れがある。

接着剤は、固定する力を接着界面全体で一様に分散して負担するので、表層版が局部的に破壊される恐れがない。よって接着剤方式が他の方法より優れているため、試験施工時の接着不良の原因を探り、その対策を立てるものとした。

#### 4.3 表層と基層の接着剤の変更

接着不良の生じた工区の施工が行われたのは、高温多湿の日であったため、温度、湿度及び接着面の圧着時間の接着強度への影響を検討する試験を行った。試験に使用した接着剤は、ウレタン樹脂とエポキシ樹脂である。接着剤は温度が高いと硬化が速くなり可使時間が短くなるため、接着不良になり易い。特にウレタン樹脂は、一液型で空気中の湿気に反応して固まるので湿度の影響を受けやすい。温度と湿度の変化の大きい日本において現場施工を行うには課題が多いと言える。エポキシ樹脂は、二液を混合し、それらが化学反応を起こして固まるため湿度の影響を受けない。

供試体の製作は、温度 20 °C 湿度 65% の室内で厚さ 5cm の基層版に接着剤を塗布し、ここに厚さ 2cm の表層版を置き、 $10\text{g}/\text{cm}^2$  のおもりを 10 秒間載せて取り外し、室内で 3 日間放置し、 $7\text{cm} \times 7\text{cm}$  の角柱に切り出した。この両端に図-3

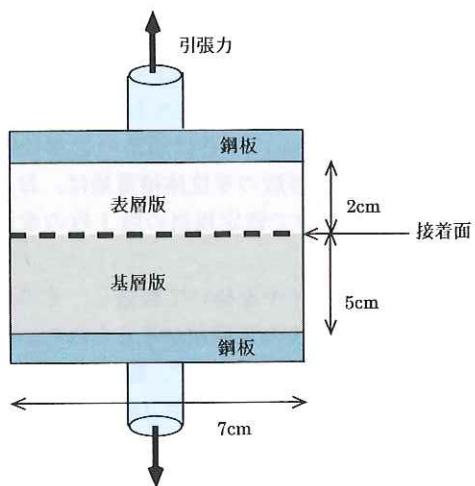


図-3 引張試験供試体

のように鋼板を接着し、引張接着試験を行った。鋼板との接着面では破壊しなかった。これを標準供試体とし、他の条件を変えずに温度を 35 °C、湿度を 80% とした供試体、他の条件を変えずにおもりによる圧着時間を 24 時間にした供試体、他の条件を変えずに接着剤塗布前に基層版に水噴霧した供試体の計 4 種類の供試体をそれぞれ比較した。

表-1 に引張接着試験の結果を示す。ウレタン樹脂とエポキシ樹脂の標準条件での引っ張り強度を比べると、エポキシ樹脂が 2 倍以上大きい。エポキシ樹脂の場合は基層版が破壊しており、接着が原因で破壊することはないと思われる。24 時間おもりで圧着した場合での接着強度はウレタン樹脂もエポキシ樹脂も標準と概ね同じであることから、標準条件で充分に接着することを示している。ウレタン樹脂の基層面に水噴霧して接着した場合の接着強度は標準と概ね同じであるが、室内的温度 35 °C、湿度 80% の場合の接着強度は標準の 1/3 程度であり、気温と湿度が高い日での施工は接着不良になり易いことを示している。エポキシ樹脂の室内的温度 35 °C、湿度 80% の場合の接着強度は標準と概ね同じであり、気温と湿度が或る程度高くても接着不良にならないことを示している。エポキシ樹脂の基層面に水噴霧して接着した場合の接着強度は標準の 1 割程度しかなく、降雨後の接着作業には注意を要することを示している。この実験結果から、接着剤をウレタン樹脂からエポキシ樹脂に変更した。エポキシ樹脂接着剤の耐久性の確認が残されているが、コンクリート

表-1 引張試験結果

	ウレタン樹脂		エポキシ樹脂	
	引張強度	破壊形態	引張強度	破壊形態
標準	1.53 kgf/cm <sup>2</sup>	接着面剥離	3.60 kgf/cm <sup>2</sup>	基層凝集破壊
おもり 24時間	1.57 kgf/cm <sup>2</sup>	接着面剥離	3.80 kgf/cm <sup>2</sup>	基層凝集破壊
室内 35 °C 80%	0.52 kgf/cm <sup>2</sup>	接着面剥離	3.65 kgf/cm <sup>2</sup>	基層凝集破壊
水噴霧	2.01 kgf/cm <sup>2</sup>	接着面剥離	0.33 kgf/cm <sup>2</sup>	接着面剥離

\*標準は、おもり 10 秒間、室内的温度 20 °C、湿度 65%、水噴霧無し。

床板の鋼版接着補強工法に用いられるなど土木分野での実績があり、充分な耐久性を有すると予想している。

#### 4.4 表層と基層の接着せん断力の試算

表層と基層間の必要接着力を求めるため、接着界面に作用するせん断力を試算した。試算に用いた車両は舗装走行実験場の荷重車であり、その後輪の輪荷重  $P = 7\text{ton}$  について計算した。

自動車がブレーキをかけたとき、図-4 に示すように、進行方向と逆向きに路面から車輪へ制動力が働き、逆に車輪から路面に対して進行方向に制動反力が働く。車輪の軸重を  $P$ 、滑り摩擦係数を  $\mu$  とすると制動反力は  $\mu P$  である。制動反力  $\mu P$  が表層内を下側に伝達されて、表層と基層の接着面せん断力  $S$  となる。円形の車輪は路面との接触部分で図-5 のように変形し、接地面は点ではなく歪んだ長方形になる。せん断応力  $\tau$  は表層内を伝達される間に分散されて、接着面せん断力は表層上面に作用する制動反力より大きな面積に分布し、応力度としては小さくなると思われるが、それを無視し、接着面せん断力の分布面積と制動反力の分布面積が同じであると考えると、応力度を過大に評価するため安全側である。接地面積  $A$  と

すると、接着面せん断応力  $\tau$  は、

$$\tau = \mu P / A \quad (1)$$

で計算される。

荷重車を多孔質弹性舗装の上におき、タイヤと路面の接着面の周囲にスプレイ塗料を吹き付け、荷重車を移動させた後、塗料の付いていない部分の面積から車輪の接地面積を求めた。接地面積は、約  $A = 1,312\text{cm}^2$  であった。車輪と路面の滑り摩擦係数  $\mu$  は雨天時より晴天時の方が大きい。滑り摩擦測定車による測定から、晴天時の滑り摩擦係数  $\mu = 0.9$  程度と考えられるが、 $\mu = 1.0$  とすれば安全側である。式(1)に  $\mu = 1.0$ 、 $P = 7000\text{kg}$ 、 $A = 1,312\text{cm}^2$  を代入すれば、

$$\tau = 1.0 \times 7,000 / 1,312 = 5.3 \text{ kgf/cm}^2 \quad (2)$$

若干の安全率を見込み、 $\tau = 10\text{kgf/cm}^2$  程度以上の接着せん断強度があれば十分であろう。

#### 4.5 耐久性

多孔質弹性舗装の舗装体としての耐久性を評価するために、平成 7 年度に舗装走行実験場に試験舗装を施工し、2 年間路面性状等を調査した。その結果、わだち掘れや平坦性などの路面性状には問題は生じなかった。

#### 4.6 制動停止距離

濡潤時のすべり摩擦係数と速度の関係を模式的

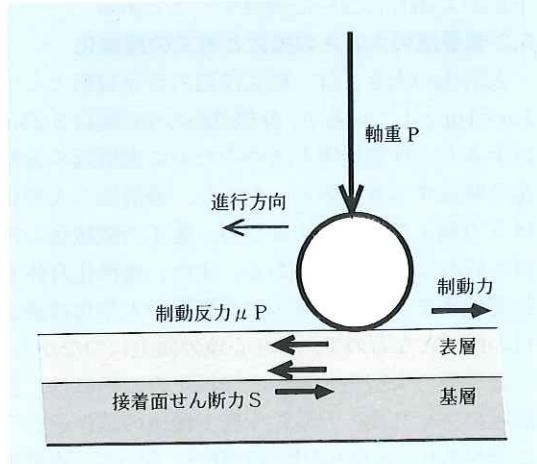


図-4 制動に起因するせん断力

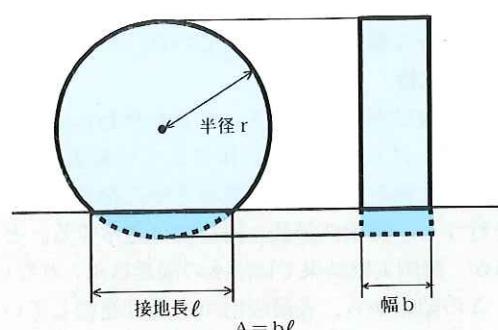


図-5 車輪の接地面積

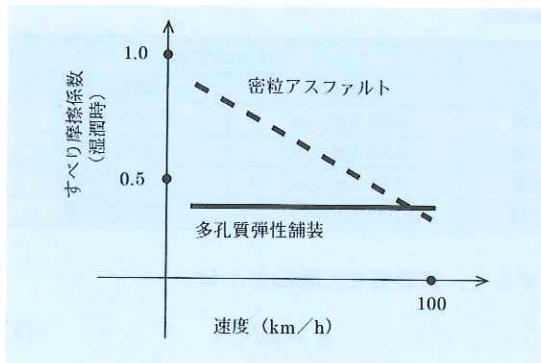


図-6 摩擦係数と速度の関係

に示すと、図-6 ようになる。

密粒度アスファルト舗装の湿潤時すべり摩擦係数は速度が 100km/h 程度では 0.4~0.5 程度で、40km/h 以下では 0.8~1.0 程度である。多孔質弾性舗装のすべり摩擦係数は速度にあまり関係なく 0.4~0.5 程度<sup>4)</sup>であり、密粒度アスファルト舗装に比べて制動停止距離が長くなる。表層版を改良して湿潤時の制動停止距離を短くする必要がある。

平成 7 年度から 3 年間経年変化を調べたが、湿潤時のすべり摩擦係数はあまり変化しなかった。

#### 4.7 区画線の検討

従来使われているアクリル樹脂を材料とする区画線を多孔質弾性舗装の上に施工すると、区画線が表層版に比べて硬いために表層版の変形に追随できず、割れて剥がれてしまう。現在、アクリル樹脂よりも柔らかいウレタン樹脂を材料にした区画線を試作し、その性能を試験している。ウレタン樹脂の区画線は、にじみが大きく見栄えが良くない、施工後乾燥に長時間を要する、アクリル樹脂に比べて高価であるなどの問題もあるが、区画線が割れて剥がれてしまうことはない。また、ウレタン樹脂を用いることで、ガラスピーブズの固着性も保たれ、試験供試体を用いた輝度測定結果では、十分な輝度が確保されている。

#### 4.8 排水性

表層版は空隙率が大きいにもかかわらず、雨水が浸透しにくい。現在試作されている表層版は、界面活性剤を混ぜた水で飽和させた後に透水試験を行うと、排水性舗装と同程度に透水する。ところが、降雨実験結果では雨水の浸透は見られない。

この結果から、表層版内の空隙は連続しているが大きさが小さく、さらに表層版の主材料であるゴムが撥水性を有しているため、雨水の浸透を妨

げていると推測される。

走行安全性のためには、雨水が表層版に浸透して空隙から排水されるように改良する必要がある。改良が難しければ、密粒度アスファルト舗装と同様に確実に表面排水しなければならない。

#### 4.9 乗り心地

試験走路で多孔質弾性舗装の区間と密粒度アスファルト舗装の区間を被験者に走行してもらい、乗り心地についてアンケートを実施したところ、多孔質弾性舗装は密粒度アスファルト舗装より乗り心地が劣ると評価する人が多かった。その理由は、多孔質弾性舗装の表層版が 1m×1m の大きさであるため、1m 每に表層版の継ぎ目があり、それに起因する振動が原因と推測している。

#### 4.10 耐火性

多孔質弾性舗装と密粒度アスファルト舗装の上にガソリンをまいて点火し、その延焼状況を観察した。密粒度アスファルト舗装の場合はガソリンの浸透がないので、表面にガソリンが広がり、激しく燃え続けた。多孔質弾性舗装はガソリンが浸透するので、表面にはガソリンが少ししか残らず、密粒度アスファルト舗装に比べて燃え方は穏やかである。火災の危険だけに限ると、多孔質弾性舗装は密粒度アスファルト舗装より安全である。

### 5. 残された検討課題

#### 5.1 研究の不充分な項目

上記 4.3 のエポキシ樹脂接着剤の耐久性、4.6 の制動停止距離、4.8 の排水性、4.9 の乗り心地についてはさらに研究を続ける必要がある。その他、下記の 5 項目について検討すべきである。

#### 5.2 表層版の大きさの拡大と施工の機械化

表層版の大きさは、研究段階の暫定規格として 1m×1m としているが、幹線道路の車線幅は 3.25m 以上あり、作業能率を高めるために表層版の大型化を検討すべきである。ただし、表層版の大型化は人力施工を困難とするため、施工の機械化の検討も同時に実行が必要がある。また、機械化自体も作業能率を高める。さらに表層版の大型化は継ぎ目の削減となるので、乗り心地の向上につながる。

表層版の大型化と施工の機械化のためには、表層版のプレス機の大型化や施工機械の試作を行う必要があり、かなりの投資が伴う。従って、表層版の大型化と施工機械の検討は、多孔質弾性舗装の

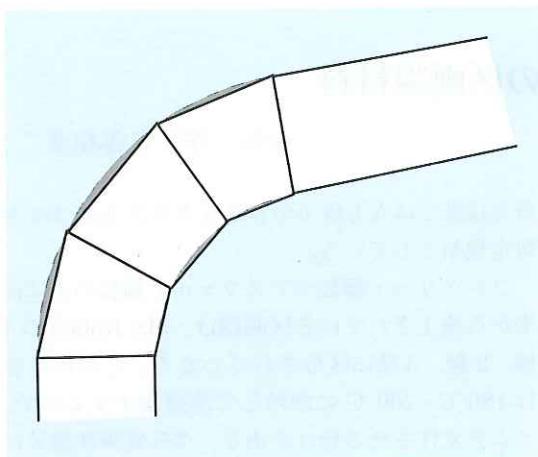


図-7 曲線部の施工

実用化のめどが立った時点から行うのがよいと考えている。

### 5.3 表層の現場施工の可能性の再検討

筆者らの研究では、工場製作方式を選択したため、搬入した矩形の表層版を基層に接着する。その際、図-7のように表層版を曲線に合わせて切断、張り合わせるため煩雑となりやすい。直線区間であっても表層版の継ぎ目から振動が生じる。これらを考慮すると、表層版の製作について現場施工方式も捨て難いと思われる。強度と空隙率管理が理由で工場製作方式を選択したので、現場施工方式で強度と空隙率管理ができないか再検討する必要がある。

### 5.4 照明の設計への影響

現在試作されている表層版の色は、廃タイヤから作られているため、普通のアスファルト舗装よりもかなり黒い。路面の輝度が異なると夜間の視認性に影響するので、照明の設計の際に考慮すべきである。

### 5.5 表層版のすり減り粉末の有害性の有無

多孔質弾性舗装は、全く新しい考え方にもとづ

く舗装であるので、表層版のすり減り粉末が有害であるか否か知られていない。実用化の前に、有害でないことを確認しておかなければならない。

### 5.6 表層版の再利用

多孔質弾性舗装も何年かの後には、打ち換えることになるであろう。そのとき、再リサイクル化も含めた古い表層版の処理についても検討しておく必要がある。

## 6. おわりに

現在、民間会社 12 社と共同研究を実施しており、この共同研究のなかで制動停止距離等について改良を行っている。この改良により、安全性の確認ができれば、できるだけ早い時期に供用路線で試験施工を行い、実用化に向けて検討を急ぎたい。

## 参考文献

- 1) (財)建設物価調査会:低騒音舗装の概説,1996.12
- 2) 大西博文、南里吉輝:多孔質弾性舗装の開発—材料粒子、舗装厚と自動車走行騒音、車外振動との関係ー,日本音響学会講演論文集,1997.9
- 3) 明嵐政司、仲柴二三夫、長谷部正基:排水性舗装の騒音低減効果の改善に関する研究,交通工学,交通工学,Vol.30,No.5,1995.9
- 4) 大西博文、明嵐政司、小野田光之:多孔質弾性舗装のすべり摩擦特性に関する研究,交通工学,Vol.32, No.5, 1997.9

小林 保\*



関西国際空港(株)  
(前 道路部総合交通安全  
研究官)  
Tamotsu KOBAYASHI

近藤 升\*\*



建設省土木研究所  
環境部交通環境研究室  
主任研究員  
Noboru KONDO

佐々木巖\*\*\*



同 材料施工部化学研究室  
研究員  
Iwao SASAKI

池原圭一\*\*\*\*



同 道路部道路研究室  
研究員  
Keiichi IKEHARA

安藤和彦\*\*\*\*\*



同 道路部交通安全研究室  
主任研究員  
Kazuhiko ANDO

久保和幸\*\*\*\*\*



同 道路部舗装研究室  
主任研究員  
Kazuyuki KUBO