

## IV-5 舗装の低騒音・低振動機能の回復に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平12～平16

担当チーム：舗装チーム

研究担当者：伊藤 正秀、小長井 彰祐

### 【要旨】

道路交通による騒音や振動を抑制し沿道環境を改善するため、排水性舗装の舗設による低騒音化や表層打換えでの平滑化による低振動化を図る場合がある。しかし、これらの方策では、供用とともに抑制効果が低下するため、機能の回復が必要となる。このため、本研究では、清掃等による舗装の騒音低減機能の回復に関する検討及び路床強化等に比べて小規模な工事で振動軽減効果の持続性を向上させることができる舗装技術の開発を行った。その結果、コストパフォーマンスを考慮した適切な排水性舗装の機能回復手法を提案できた。また、振動軽減効果がある3種類の舗装技術を開発した。

キーワード：排水性舗装、機能回復、現場透水量、振動レベル、振動測定

### 1. はじめに

交通騒音対策の一つとして、空隙率の高い排水性舗装の利用が進んでいる。しかし、排水性舗装は、塵埃による空隙詰まり等により数年で低騒音機能が低下するため、その機能の回復が必要になっている。また、交通振動の発生に対しては、表層の打換えによる平滑化等が行われるが振動抑制効果の持続性が課題となっている。

そこで、本課題では、排水性舗装の低騒音機能の回復手法として、空隙中の塵埃等の除去技術を用いた維持管理手法の検討、補修による低騒音機能回復方法の検討を行った。また、振動軽減効果の高い舗装を開発した。

### 2. 課題の整理と本研究の必要性

#### 2.1 低騒音舗装の機能回復に関する課題

排水性舗装では、経年とともに透水機能および低騒音機能の低下が報告されている<sup>1), 2)</sup>。これら機能低下の原因は、空隙つぶれや空隙詰まり等が考えられる。

空隙つぶれは、高温時のアスファルトの流動や走行車両のタイヤがアスファルトモルタルを引きずることにより生じるが、アスファルトの改良による対応がとられている。

空隙詰まりについては、排水性舗装技術指針(案)に、①高圧水、②圧縮空気、③バキューム、④高圧水とバキュームの併用、⑤過酸化水素水の利用等の方法が記載されており、民間で④高圧水とバキュー

ムの併用方式が主に開発され、市販されている。これらの機器は、空隙詰まりに対しては一定の効果があるものの、空隙つぶれによる透水量低下、騒音低減機能低下および表面の荒れによる騒音低減機能の減少に対しては効果が期待できない。

直轄国道の排水性舗装区間においては、北陸地方整備局で定期的に機能回復作業をしており、他の一部地方整備局では機能回復に関する調査検討を試験的に行っている。一方、機能の低下を問題視しつつも、機能回復作業による回復効果が不明であること、機能回復作業のコストに見合った効果が得られるか不明であること等により、多くの地方整備局では維持方法が確立されていない状況である。

排水性舗装の低騒音機能の機能低下及び機能回復の程度の評価方法について、路面騒音の適切な測定方法は開発段階にあるため、騒音値で評価することは困難である。一方、透水機能の回復と騒音低減機能の回復には相関があるとの既往の報告<sup>3)</sup>もある。

以上により、本研究では、排水性舗装の低騒音機能の回復手法として、空隙中の塵埃等の除去技術を用いた維持管理手法および補修による低騒音機能回復方法について、透水量の回復量を指標としてコストパフォーマンスを考慮し検討することとする。

#### 2.2 低振動舗装に関する課題

交通振動の発生原因には、路面の平たん性の低下、路床の支持力不足、交通荷重の超過等が考えられる。これらの振動に対して、従来は表層の打換えによる平滑化、路床の強化等による対策が考えられている

が、表層の打換えによる平滑化は、振動軽減効果の持続性に課題がある。また、路床の強化では大規模な工事が必要となり、実際の対策としては困難な場合が多い。

このため、本研究では、比較的小規模な工事で振動軽減効果の持続性が高い舗装技術を開発することとする。

### 3. 低騒音舗装の機能回復に関する検討

#### 3. 1 室内試験

##### 3. 1. 1 実験方法

試験室内で0.8m×0.8mの排水性舗装供試体を作製し、機能劣化を人工的に加え、これを用いて機能の回復方法について検討した。機能の劣化、回復方法の詳細は表-1の通りである。

表面機能回復工法として、透水性樹脂モルタルの充填工法と表面に樹脂コートする工法の2種類を行った。また、空隙つまり供試体のみ施工前に高圧水洗浄での機能回復を行った。

表-1 室内検討供試体

供試体 No.	表面劣化方法	表面機能回復工法
1	なし	表面樹脂コート
2		樹脂モルタル
3	空隙つまり	表面樹脂コート
4		樹脂モルタル
5	摩耗	表面樹脂コート
6		樹脂モルタル
7	空隙つぶれ	表面樹脂コート
8		樹脂モルタル

路面性能は、タイヤ/路面騒音、テクスチャ、現場透水量等を測定した。騒音の測定には、0.8m×0.8mの供試体にタイヤを走行させる「騒音シミュレータ」<sup>4)</sup>を用いて室内において行った。路面テクスチャの測定は、CTメータ(回転式テクスチャメータ)、現場透水量は現場透水量試験器によって行った。それぞれの試験条件概要を表-2に示す。

表-2 室内試験条件概要

測定機器と内容	項目	条件
騒音シミュレータ 騒音測定	タイヤ種類	小型ラグ
	タイヤ外径	223mm
	タイヤ空気圧	100kPa
	タイヤ温度	30℃
	回転周速度(km/h)	50
	載荷荷重(kN)	1.1
	騒音評価値(dB(A))	5回平均値 Leq
CTメータ テクスチャ測定	測定距離/路面	5m
	サンプリング間隔	0.22mm
	スポット径	0.07mm
	測定範囲	±15mm
	分解能	3μm
現場透水量試験器 現場透水量測定	止水材幅	40mm
	有効径	150mm

### 3. 1. 2 実験結果

#### 1) 機能劣化

騒音測定結果を図-1に、接触部分比の結果を図-2に、透水量を図-3に、劣化の種類別の周波数特性を図-4に、機能回復種類別周波数特性を図-5にそれぞれ示す。

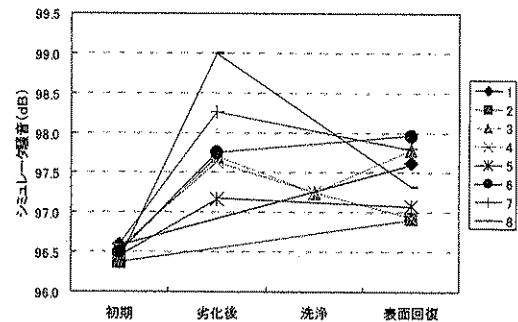


図-1 騒音測定結果

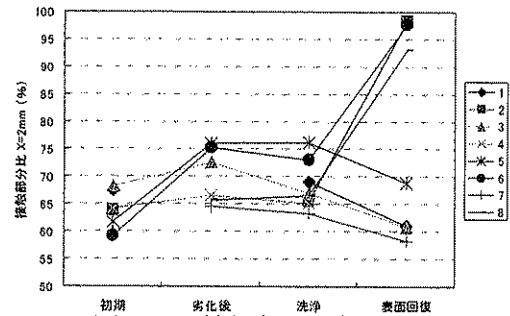


図-2 接触部分比結果

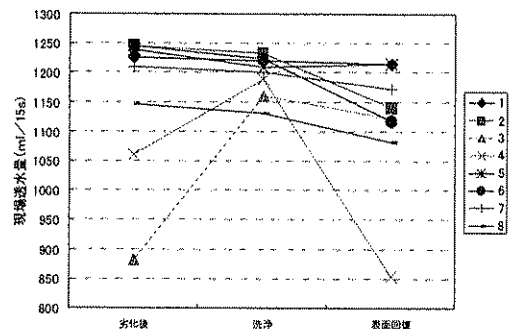


図-3 現場透水量結果

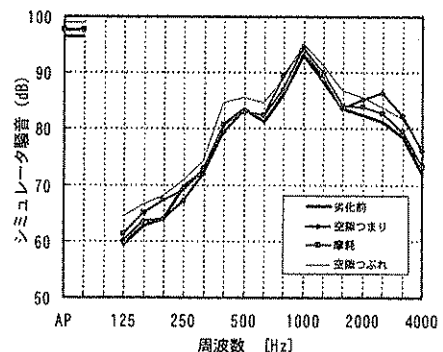


図-4 劣化種別周波数特性

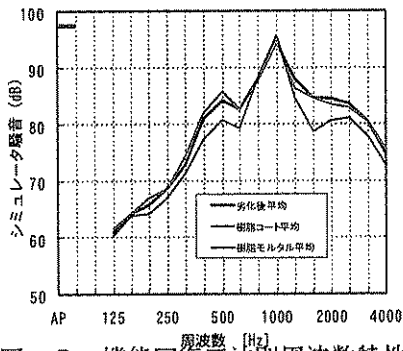


図-5 機能回復工法別周波数特性

図-1より、3種類の劣化によって、騒音はすべて初期値よりも大きくなったことがわかる。

空隙つまりさせた場合については、図-4から、2000Hz以上の帯域が劣化前より大きくなったことからエアポンピング音の増大が起こったために、騒音が初期より大きくなったと考えられる。

表面を摩耗させた場合については、接触部分比が大きくなり、透水量は若干低下した。これまでの研究<sup>9)</sup>から接触部分比が大きくなる場合には騒音が小さくなる傾向がみられていたが、今回の場合には逆に大きくなった。これは表面の摩耗によって軟らかいモルタルがなくなり骨材が露出したために表面硬度が上がり、タイヤ加振音が大きくなったことが影響したのではないかと考えられる。

空隙をつぶれさせた場合については、表面のモルタルがつぶれることで表面空隙の閉塞や表面の骨材の露出が生じ、これによりエアポンピング音と加振音がどちらも大きくなったものと考えられる。

## 2) 補修による機能回復

騒音低減機能の補修による回復について、表面樹脂コート、樹脂モルタル施工の2種類検討した。

表面樹脂コート工法は、図-1～3の奇数番号の結果であるが、騒音低減効果の回復には必ずしも有効とはいえない結果となった。今回の樹脂コートでは接触部分比が低下し、透水量も若干低下する結果となっており、この傾向からも騒音低減効果の回復は期待できない。表面樹脂コートは表面性状をコントロールできるため、今後は騒音低減に効果のある範囲を求め工法を工夫することにより、機能回復工法となるものと考えられる。

また、図-5から表面樹脂コートの平均的な周波数特性は、表面樹脂コート塗布前のものと比較して1000Hzを境に低周波数帯域で大きく、高周波数帯域で小さくなる傾向が見られた。このことから、今回行った樹脂コート工法は、接触部分比が小さくなっ

た影響でタイヤ加振音が発生したと考えられた。したがって、この結果からも表面性状を意識した材料・塗布方法の検討が必要であると考えられた。

樹脂モルタル充填工法は、透水量低下を抑えながらテクスチャを平坦にすることによる騒音低減効果を期待して行った。図-1から、摩耗による劣化のものは騒音が増大し、空隙つぶれ、空隙つまりの洗浄後の2つは騒音が低減した。よって、樹脂モルタルによっても表面樹脂コートと同様に機能低下した路面の機能回復が期待できると考えられる。

図-5から、樹脂モルタルの平均的な周波数特性は、表面樹脂コート塗布前のものと比較して1000Hzのみ大きく、他の周波数帯域ほぼ全てにおいて騒音が小さくなる結果となった。したがって、タイヤ加振音、エアポンピング音のどちらの低減も期待できることがわかった。

## 3. 2 実道における機能回復試験

### 3. 2. 1 実験方法

#### 1) 調査概要

長期供用した現道上の排水性舗装上で、清掃による機能回復作業を行い、作業前後の機能の変化、路面性状の変化を調査した。

#### 2) 調査箇所

調査は、つくば市内の平成4年に施工(供用10年)した排水性舗装上で行った。粒度の異なる4種類の排水性舗装、比較のための密粒度舗装が施工されている現道上の試験工区であり、図-6のような概要の箇所である。各工区の構造を表-3に示す。

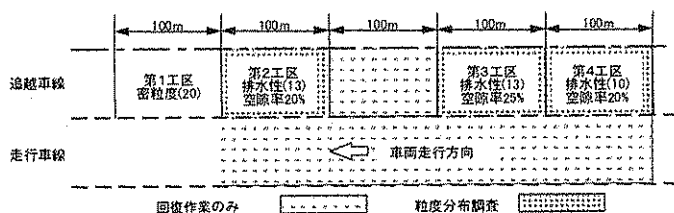


図-6 調査箇所

表-3 各工区の表層混合物

	第1工区	第2工区	第3工区	第4工区
表層 5cm	密粒度 最大粒径13mm	排水性 最大粒径13mm 空隙率20%	排水性 最大粒径13mm 空隙率25%	排水性 最大粒径10mm 空隙率20%

#### 3) 機能回復方法

機能回復作業は、表-4に示す機能回復車を用いて行った。機能回復車とは、舗装の上面より高圧水をあて、空隙の詰まり物を破碎し、高圧吸引により

これを回収する機能を持つ車である。泥水状で吸引された詰まり物質は、機能回復車内で固液分離され、水はある程度繰り返し使用できる構造となっている。

表-4 機能回復車の主な仕様

回収方式	吸引+エアカーテン
噴射水圧	最大 10MPa, 作業時 5MPa
噴射水量	340 l/min
最大吸引能力	100m <sup>3</sup> /min, -0.04MPa
最大送風能力	100m <sup>3</sup> /min, 0.04MPa

#### 4) 調査項目

調査は、機能回復前、簡易清掃後、機能回復後のそれぞれの段階で行い、路面性状調査、騒音測定、コア抜き等を行った。調査内容を表-5に示す。

表-5 調査項目

項目	機能回復前	簡易洗浄後	機能回復後
平坦性	○		
わだち掘れ	○		
ひび割れ率	○		
現場透水量	○	○	○
テクスチャ	○	○	○
騒音測定	○		○
コア抜き	○		○

ここで、簡易清掃とは、路面の 50cm×50cm 上に一定条件で水を浸透させた後、掃除機で吸引して行った。また、テクスチャは、回転式テクスチャメータ (CTM: ASTM E2157-01) を用いて測定した。

### 3. 2. 2 実験結果

#### 1) 空隙詰まり物の除去特性

##### (1) 抜き取りコアの断面観察

空隙詰まり物の詰まり状態をみるために、現場から抜き取ったコアの断面を観察した。コアを採取する時の切り取り断面は、切り取りの際の熱や水により、アスファルトが溶けたり詰まり物が流出したりするため、コアを 60℃程度に温め、手で半分に割り、その断面を観察した。

断面の様子を表-6に示す。過去の報告<sup>5)</sup>によれば、排水性舗装では、非わだち部では上から詰まり、わだち部では下から詰まり、さらに詰まりが進行すると全層詰まると報告されている。今回の調査では、わだち部では全層詰まっているところがほとんどであり、十分進行した状態であった。今回の調査箇所は 10 年という長い期間機能回復等を行っていないため、これまでの報告と同じように全層詰まった状態になったものと考えられた。

表-6 抜き取りコアの断面観察の結果

工区	車線	位置	機能回復前	機能回復後
第2工区	走行	BWP	上から6割	上から5割
	追越	BWP	上から5割	上から7割
OWP		上から7割	10割	
第3工区	走行	BWP	上から9割	上から9割
	追越	BWP	上から8割	上から8割
		OWP	10割	10割
第4工区	走行	BWP	上から7割	上から9割
	追越	BWP	上から6割	上から7割
		OWP	10割	10割

※“上から○割”とは、排水性舗装5cmのうち、上から○割程度詰まり物で詰まっていることを指す。

#### (2) 詰まり物量

機能回復作業によって、回収された詰まり物の量を図-7に示す。工区によって差が大きく、回収量は粒径の小さい第4工区が最も少なく、空隙率が大きい第3工区で多くなった。

抜き取りコアの内部に溜まった詰まり物を過酸化水素を用いて全て取り出して、全詰まり物量を測定した。結果を図-8に示す。機能回復前後で測定したが、全ての箇所機能回復後は詰まり物量が減っており、詰まり物が除去されている様子が分かる。

空隙内に溜まった物質の除去率を図-9に示す。図-9の除去率は、図-7のタンク内物質量と図-8の機能回復前の全詰まり物質量から計算した。空隙率の大きい工区で除去率が大きくなり、粒径、空隙径が小さい第4工区の除去率が最も低くなった。

いずれの場合も、除去率としては数~10%程度であり、長期間機能回復等を行っていない排水性舗装では、効果的な除去は困難であると考えられた。

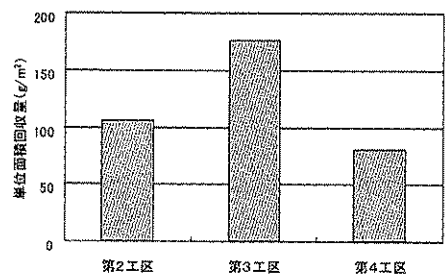


図-7 機能回復車に回収された固形物量

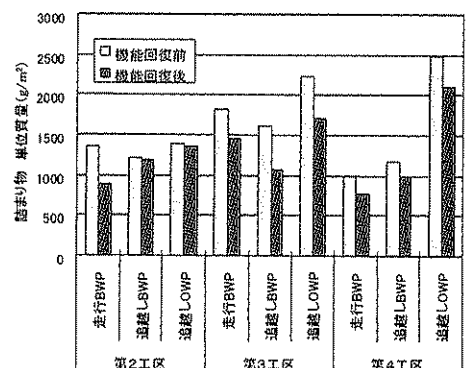


図-8 舗装内に溜まった全詰まり物量

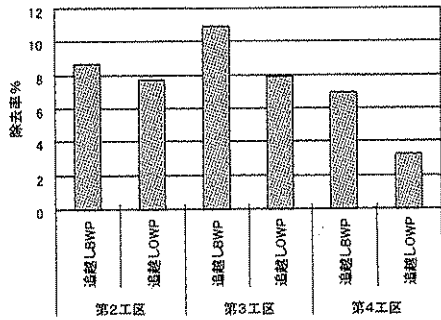


図-9 全詰まり物に対する除去率

## 2) 詰まり物の粒度分布

機能回復車により回収された物質の粒度を図-10に示す。ここでは比較として、東京国道事務所管内で計測した例<sup>9)</sup>を併記している。つくば市内で回収された物質は、都市部で採取された回収物質と比べ、粒径が非常に細かいことがわかった。これは、つくばの空隙詰まり物は周辺の土壌由来の細かい成分が多いが、都市部では土壌由来の成分が少ないためと考えられた。

抜き取りコアから回収した詰まり物の粒度分布を図-11に示す。ここでも比較のため、東京国道事務所管内で計測した例を併記した。都市部では、供用年数が長くなるほど粒度が粗くなっているが、つくばのものは粒度が細かく、回収されたものと同じような傾向であった。

以上のように、排水性舗装の詰まり物は、沿道の土地利用形態により異なるので、路線の特徴を把握した適切な洗浄の検討が必要であると考えられる。

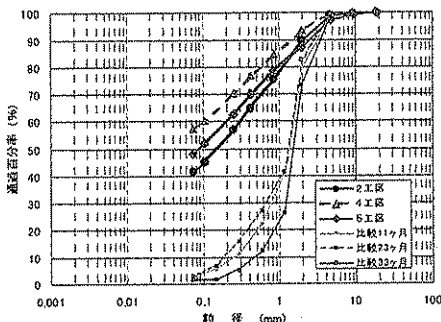


図-10 機能回復車に回収された固形物の粒度

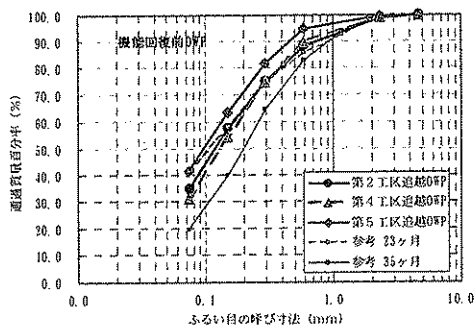


図-11 舗装内に溜まった詰まり物質の粒度分布 (機能回復前)

## 3) 機能回復特性

機能回復作業による低騒音機能、透水機能の変化の状況を図-12、13に示す。低騒音機能は、全工区で回復しておらず、透水機能もほとんどの工区で回復しなかった。

透水機能が回復しなかったことの明確な原因は分からなかった。1)の結果の通り、空隙詰まり物が除去されていたことは明らかである。原因の一つとして考えられることは、機能回復前は表面に堆積していた粗い粒子のすき間を透水して、透水量として計測されていたが、機能回復後は表面が洗浄され透水量測定時の止水材が密着するようになったため、透水量が小さくなったことも考えられた。

低騒音機能が回復しなかった原因については、テクスチャの粗化が考えられた。今回の調査におけるテクスチャの変化を図-14に示す。機能回復により、いずれの場合もテクスチャは粗くなっている。

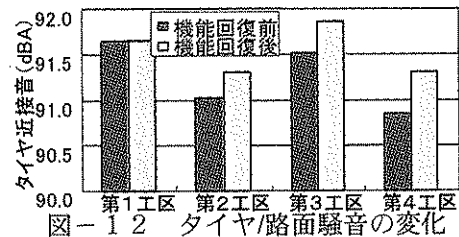


図-12 タイヤ/路面騒音の変化

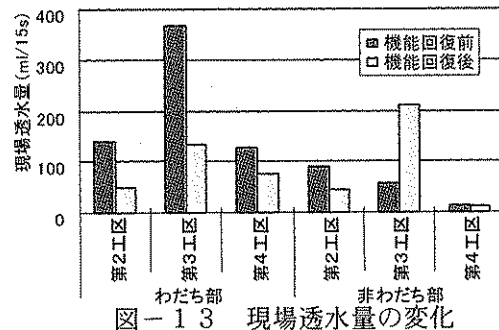


図-13 現場透水量の変化

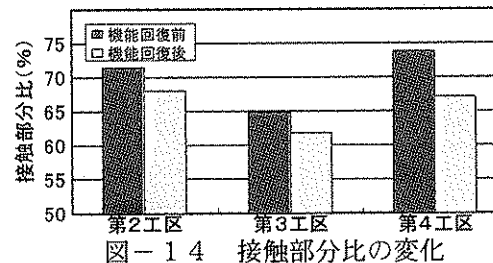


図-14 接触部分比の変化

## 3.3 機能回復作業頻度の検討

### 3.3.1 機能回復車の作業速度

排水性舗装の適切な機能回復作業頻度の検討に先立ち、機能回復車の現状を調査した。実用化されている機能回復車は標準型(1km/h程度)と高速型(10km/h程度)に大別できることがわかった。

### 3. 3. 2 供用性曲線の設定手法の検討

排水性舗装の透水機能に関する供用性曲線は、現場透水試験から得られる透水量の推移を示すものとする。透水機能に関する供用性曲線は、供用後機能回復作業を全く行なわなかった場合の供用性曲線（以下、マスターカーブとする。）と、機能回復作業による回復量と機能回復作業後の供用性曲線（以下、機能回復カーブとする。）に区分して検討、設定する。排水性舗装の透水機能に関する供用性曲線の概念図を図-15に示す。

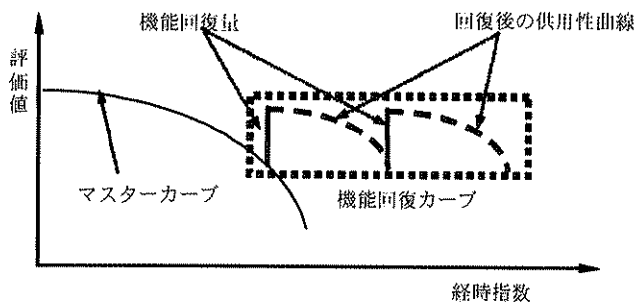


図-15 排水性舗装の透水機能に関する供用性曲線の概念図

また、ライフサイクルコスト算定には透水機能の他に舗装体としての寿命が必要なため、路面性状の指標であるMCIの供用性曲線についても設定する。

#### 1) 透水量の供用性曲線の検討

##### (1) 透水量データの収集・整理

各地方整備局の透水量データを収集し、各種条件に分類し、それぞれ供用性曲線を作成し検討した。条件別透水機能の傾向を表-7に示す。

表-7 条件別透水機能の傾向

分類項目		《 早い 低下の進行 遅い 》	
現場条件	地域	積雪寒冷地域	一般地域
	沿道条件 <sup>注)</sup>	市街地、山地・平地	DID地区
	設計大型車交通量	旧B・C交通	旧D交通
	測点位置	非わだち部	わだち部
舗装構成混合物	最大粒径	13mm、9~10mm	8mm以下
	舗装構成	1層	2層

注) 沿道条件の分類は舗装管理支援システムに準じた。なお、分類は以下の4種類である。

DID地区：人口集中地区のことで「市区町村の区域内で人口密度の高い(約4000人/km<sup>2</sup>以上)調査区域が互いに隣接して、その人口が5000人以上となる地域」

市街地：道路の両側に人家が連担し、市街部を形成している地域でDID地区以外の地域

平地：人家が連担しておらず、道路勾配が緩やかな地域

山地：山地、丘陵および山麓地域

##### (2) マスターカーブの設定

マスターカーブの設定にあたって、目的変数、説明変数および線形について検討した。

透水量データには特異値が含まれる可能性が高い

ため、本研究では階級の設定により特異値の影響を小さくした。階級幅の検討結果を表-8に示す。この結果、階級幅は3ヶ月以上とすれば、有意であることがわかった。目的変数の設定対象は、透水量の実測値や施工直後との比率等が考えられたが、本研究では相対的に相関係数が高い透水量の実測値を目的変数とした。

説明変数の設定対象は、経過月数、累積大型車交通量、累積49kN換算輪数等が考えられたが、本研究では、相関係数が高い経過月数を説明変数とした。

表-8 階級幅の検討結果

階級幅	有効階級数	決定係数
1ヶ月	51	0.63
3ヶ月	22	0.86
6ヶ月	15	0.94

以上の通り、目的変数、説明変数を設定し、回帰式の線形について、1~4次式まで検討した結果を表-9に示す。1次式で十分に有意であったため、マスターカーブは1次式とした。

表-9 線形別検討結果

	回帰式	決定係数
1次式	$y = -14.96x + 1096$	0.86
2次式	$y = 0.11x^2 - 23.41x + 1198$	0.89
3次式	$y = -0.0005x^3 + 0.166x^2 - 25.13x + 1207$	0.89
4次式	$y = 0.0002x^4 - 0.025x^3 + 1.399x^2 - 45.42x + 1269$	0.90

作成したマスターカーブの検証のためつくば市内で平成4年に施工(供用10年)した排水性舗装の透水量経年データと比較した結果を図-16に示す。当初はつくば市内の透水量が高いが、その後の傾向はマスターカーブと同様であることがわかる。

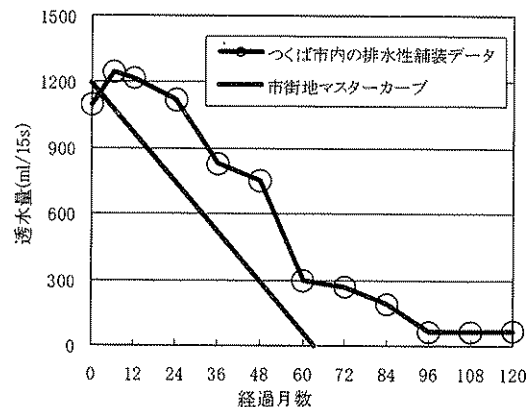


図-16 つくば市内排水性舗装の透水量経年データとの比較

### (3)機能回復カーブの設定

機能回復カーブの設定にあたって、機能回復量と回復作業後の供用性曲線について検討した。

機能回復作業を行うことで舗装内の塵埃の堆積状況が変化し、同一箇所における1回目の回復作業の効果と2回目以降の回復作業の効果は同等ではない可能性があった。このため、回復作業回数別の回復量について検討したが、回数による明確な違いはみられなかった。このため、回復作業回数別の回復量については、マスターカーブと同じように検討し、階級幅は50ml/15sec、線形は2次式とした。回復量について、一般地域における検討結果の例を図-17に示す。

マスターカーブの傾きと回復作業後の供用性曲線の傾きを図-18に示す。両者の最頻値が同じ階級にあることから傾きは同程度であると判断し、同じ係数を用いることとした。

### 2) 路面性状の供用性曲線の検討

#### (1)舗装管理支援システムのデータ整理

舗装管理支援システムから排水性舗装区間のデータを抽出した。次に、前回測定の前透水量のMCIよりも最新測定の区間のMCIの方が大きな値となった区間、前回調査と最新調査の間に補修を行なった区間等、明らかに本検討に適さないデータを除外した。

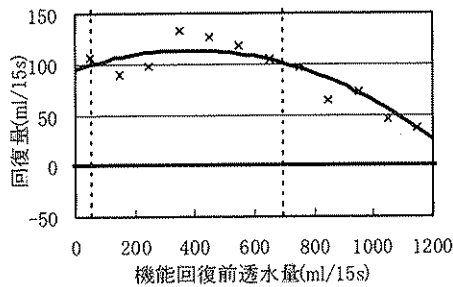
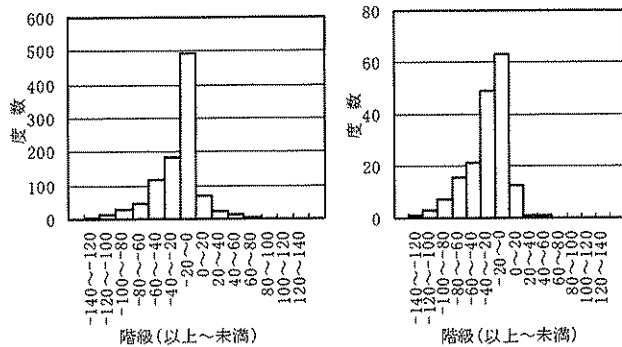
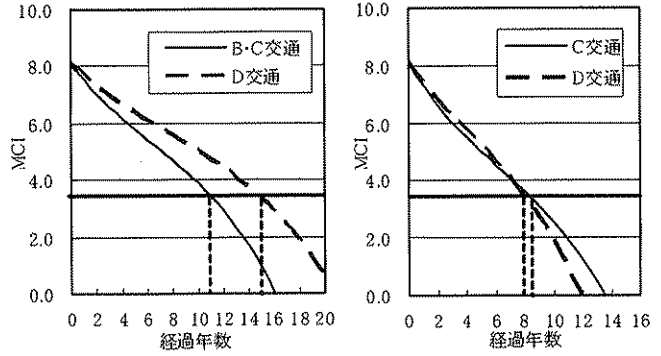


図-17 一般地域の透水量回復量検討結果



(a) マスターカーブの傾き (b) 機能回復カーブの傾き

図-18 マスターカーブと回復作業後の供用性曲線の傾き



(a) 一般地域

(b) 積雪寒冷地域

図-19 MCIの予測推移

### (2)各路面性状予測式の作成

ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性について、漸化式タイプの予測式を以下の手法により算定した。ここで、 $i$  年度の実測値 (前回測定値) を  $M_i$ 、 $i+3$  年度の実測値 (最新測定値) を  $M_{i+3}$  とする。

$$\text{3年間の変化量} = M_{i+3} - M_i$$

$$\text{1年間の変化量} = (M_{i+3} - M_i) / 3$$

$$\text{1年後の予測値} : M_{i+1} = M_i + (M_{i+3} - M_i) / 3$$

1年後の予測値  $M_{i+1}$  を目的変数、 $M_i$  を説明変数として回帰分析を行い、 $M_{i+1} = aM_i + b$  の形式の予測式を設定した。

### (3)MCI 予測式作成

MCI の予測値は、(2)で検討したひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性の各予測式を下の4つの式に代入し算出した結果の最小値である。

$$MCI = 10 - 1.48C^{0.3} - 0.29D^{0.7} - 0.47\sigma^{0.2}$$

$$MCI_0 = 10 - 1.51C^{0.3} - 0.3D^{0.7}$$

$$MCI_1 = 10 - 2.23C^{0.3}$$

$$MCI_2 = 10 - 0.54D^{0.7}$$

ここで、C:ひび割れ率(%), D:わだち掘れ量(mm),  $\sigma$ :平坦性(mm)

MCI の予測値を多項式により回帰した MCI の予測式を表-10、MCI の予測推移を図-19に示す。

表-10 MCI の予測式

一般地域	旧B・C交通	$y = -0.0014x^3 + 0.0237x^2 - 0.523x + 8.1$
	旧D交通	$y = -0.0012x^3 + 0.0271x^2 - 0.460x + 8.1$
積雪寒冷地域	旧C交通	$y = -0.003x^3 + 0.0582x^2 - 0.8334x + 8.1$
	旧D交通	$y = -0.0035x^3 + 0.044x^2 - 0.7092x + 8.1$

この結果、MCI=3.5 になるまでの供用年数は表-11 のように推定された。

表-11 MCI=3.5 になるまでの供用年数

一般地域		積雪寒冷地域	
旧B・C交通	11年	C交通	9年
旧D交通	15年	D交通	8年

### 3.3.3 最適作業頻度の検討

#### 1) コスト分析に用いた供用性曲線

3.3.2 1) で得られたマスターカーブ(表-12)と機能回復カーブ(表-13)から、各回復作業頻度に対する透水量の各供用性曲線を設定した。仮定した各回復作業頻度の供用性曲線から推定した透水量が 0ml/15sec となるまでの供用年数を表-14に示す。

一般地域では回復作業による透水量の持続効果を期待できるが、DID 地区以外の積雪寒冷地域では、持続効果をあまり期待できないことがわかった。

排水性舗装の効率的な維持管理計画は、路面性状の供用性曲線と透水量の供用性曲線との関係を考慮して機能回復作業の頻度や補修年度を決定することが重要である。

表-12 マスターカーブ

地域条件		回帰式
一般地域	DID 地区	$y = -14.89x + 1194.4$
	市街地	$y = -18.81x + 1195.3$
	平地・山地	$y = -21.08x + 1255.0$
積雪寒冷地域	DID 地区	$y = -20.78x + 1223.7$
	市街地	$y = -37.85x + 1226.8$
	平地・山地	$y = -25.09x + 1122.1$

表-13 機能回復カーブ

地域条件	回帰式
一般地域	$y = -0.0001x^2 + 0.0985x + 94.9$
積雪寒冷地域	$y = -0.0001x^2 + 0.1116x + 17.5$

表-14 透水量が 0ml/15sec となるまでの供用年数

地域	回復作業頻度	1 回/1 年		
		1 回/1 年	1 回/2 年	作業なし
一般地域	DID 地区	17 年	10 年	7 年
	市街地	10 年	8 年	6 年
	平地・山地	9 年	6 年	5 年
	回復作業頻度	1 回/6 ヶ月	1 回/1 年	作業なし
積雪寒冷地域	DID 地区	7 年	6 年	5 年
	市街地	3 年	3 年	3 年
	平地・山地	5 年	4 年	4 年
	回復作業頻度	1 回/6 ヶ月	1 回/1 年	作業なし

#### 2) ライフサイクルコスト算定条件

機能回復作業の最適頻度を検討するため、ライフサイクルコストの算出を行った。コスト分析の一般条件を表-15に示す。

表-15 コスト分析の一般条件

解析期間	40 年
社会的割引率	4%
計算方法	現価法

#### 3) 道路管理者費用

道路利用者費用の算出方法は確立されていないことから、今回は道路管理者費用である機能回復費用と補修費用(切削オーバーレイ)について検討した。

##### (1) 道路管理者費用算定条件

維持費用 1m<sup>2</sup> 当たりの維持費用は、表-10 の MCI の予測式と次式より算出した。

$$Y(\text{円}/\text{m}^2 \cdot \text{年}) = 274.0 - 27.2\text{MCI}$$

機能回復費用、補修費用は「国土交通省土木工事標準積算基準書(平成 16 年版)」等を参考に積算した。積算結果を表-16に示す。

表-16 機能回復費用・補修費用

施工工種	単価(円/m <sup>2</sup> )
機能回復	130
切削オーバーレイ	5,000

##### (2) 道路管理者費用算定結果

費用の比較は 1m<sup>2</sup> 当たりの単価について行った。透水量のマスターカーブは表-17に示す設計大型車交通量別のものを用い、MCI、透水量の管理目標は 1) と同一とした最適(安価な)作業頻度のコスト検討を 4 ケースについて行った。最適作業頻度の結果を表-18に、ケース②の総コストと透水量の経時変化を図-21に示す。

表-17 設計大型車交通量別透水量マスターカーブ

沿道条件	設計交通量	回帰式	
		一般地域	積雪寒冷地域
DID	旧 D 交通	$y = -12.34x + 1213.7$	-
	旧 B・C 交通	$y = -17.30x + 1171.8$	$y = -20.78x + 1223.7$
市街地	旧 D 交通	$y = -17.12x + 1219.8$	$y = -38.54x + 1325.0$
	旧 B・C 交通	$y = -30.79x + 1161.4$	$y = -29.20x + 1119.1$
平地山地	旧 D 交通	$y = -18.93x + 1280.4$	$y = -26.47x + 1105.0$
	旧 B・C 交通	$y = -21.61x + 1233.6$	$y = -23.85x + 1141.2$

表-18 最適作業頻度の算定結果

ケース	地域	地区	設計交通量	最適(安価)作業頻度	総コスト <sup>①</sup> (円) 1m <sup>2</sup> あたり	作業なしとの差(円)
①	一般	DID	旧 D	1 回/1 年	14,810	5,190
②	一般	市街地	旧 C	1 回/6 ヶ月	29,750	15,250
③	一般	平地	旧 D	1 回/1 年	19,680	10,320
④	積雪寒冷	平地	旧 C	1 回/6 ヶ月	39,160	5,840

注:総コストは、40 年間にかかる道路管理者費用とした。

最適作業頻度はケース①、③では 1 回/1 年、ケース②、④では 1 回/6 ヶ月が最適作業頻度となった。ケース②では、作業なしと比べ 1m<sup>2</sup> あたり約 15,000 円安価となり、全ケースのうち最も差額が大きくな



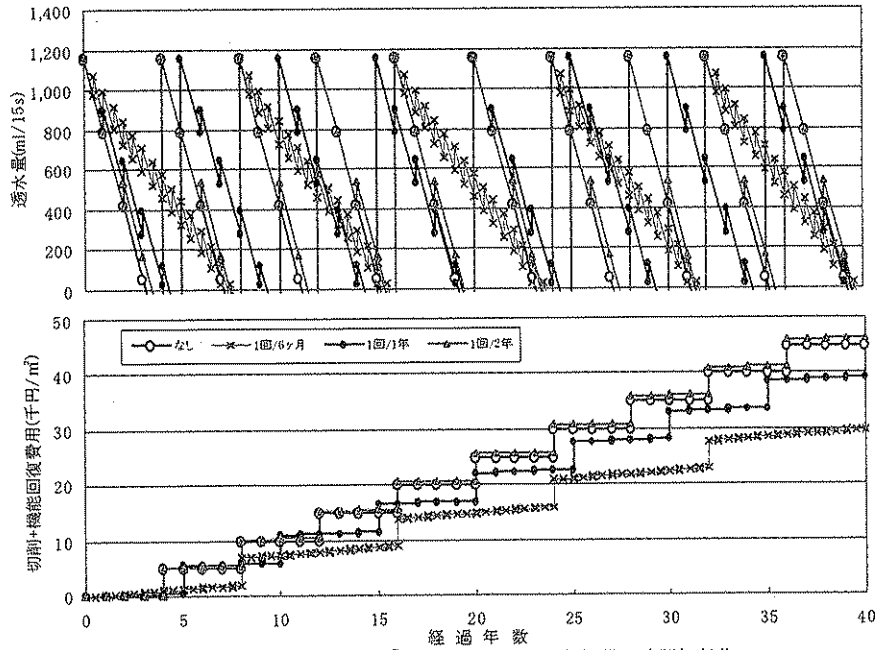


図-20 ケース②の総コストと透水量の経時変化

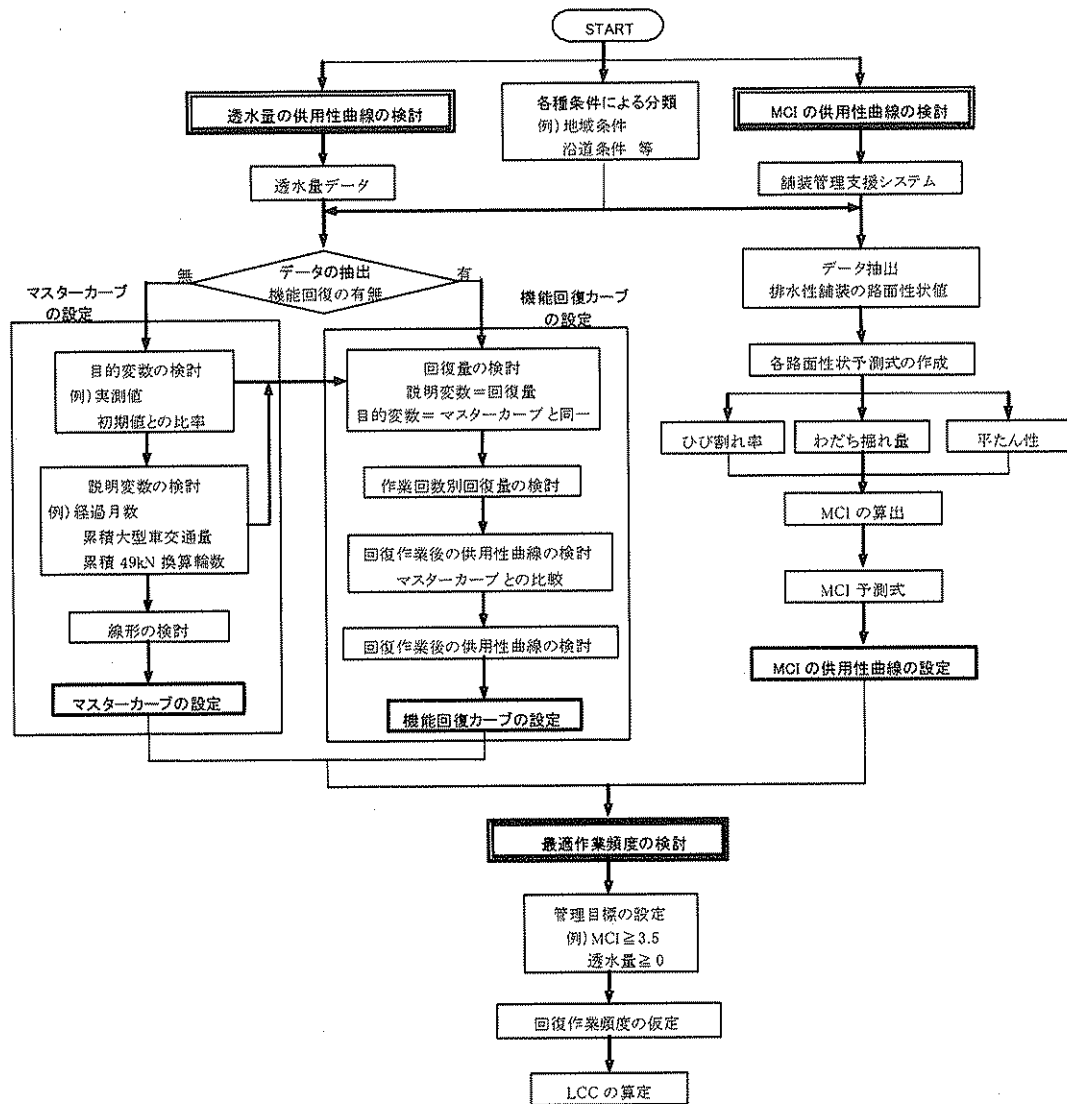


図-21 本研究における機能回復の最適作業頻度の検討フロー

った。また、今回検討した全てのケースにおいて機能回復作業を行う方が、行わないよりも管理者費用は安価となった。適切な供用性曲線を設定することによりコスト縮減の可能性があることがわかった。

### 3.3.4 機能回復手法の提案

本研究における機能回復の最適作業頻度の検討フローを図-21に示す。

本研究では、全国の透水量、路面性状データを一括的にまとめ条件別に分類、階級分けをし、効果やコスト分析を踏まえた機能回復の最適作業頻度を求めることができた。しかし、機能回復の程度や路面性状は現場条件により異なるので、機能回復作業の導入にあたっては現場毎にデータの収集・分析を行い、排水性舗装の適切な維持管理手法を検討することが必要である。

### 3.4 低騒音舗装の機能回復のまとめ

以上の結果から以下のことがわかった。

- ① 全国の透水量や路面性状データをまとめた上で条件別に分類、階級分けし、効果やコスト分析を踏まえた機能回復の最適作業頻度を求めることができた。今後、機能回復作業を導入する際は現場毎にデータの収集・分析が必要である。

- ② 表面樹脂コートや樹脂モルタル等の表面性状からの機能回復工法は、機能劣化した舗装面に対して有効な補修工法となり得ることがわかった。

## 4. 低振動舗装の開発

### 4.1 開発した低振動舗装の概要

共同研究により4種類の振動軽減型舗装を開発した。概要を表-19に示す。開発した振動軽減型舗装を舗装走行実験場に試験施工し、交通に対する耐久性を調査するために、大型車(2軸:前軸重 4.5t、後軸重 12t)を40km/hで49kN換算輪数が15万輪となるまで走行させた。促進載荷試験前後の路面性状調査の結果を表-20に示す。開発したいずれの種類の舗装も、耐久性に関して支承の配列等について十分に検討し、路面性状については問題ないことを確認できた。

### 4.2 振動軽減効果の評価方法の検討

#### 4.2.1 実験方法

共同研究により開発した3種類の振動軽減型舗装と比較区として設けた密粒舗装の計4種の舗装(工区長 36m×4)を用いて振動測定を行った。

表-19 開発した振動軽減型舗装の概要

種別	振動軽減型舗装A	振動軽減型舗装B	振動軽減型舗装C
概要	<p>※上層はType1である。Type2は、表層上部のSMA(13)を開粒度アスファルト混合物(13) (高粘度改質As) t=5cm、基層の開粒度アスファルト混合物(20)の厚さを t=6.5cmとしたものである。</p>		
概算費用 (表層、基層計 (直接工事費))	Type1 … 8,200円/m <sup>2</sup> Type2 … 7,800円/m <sup>2</sup>	19,000円/m <sup>2</sup>	78,000円/m <sup>2</sup>
	【比較】表層に密粒度混合物、基層に粗粒度混合物とした場合…2,170円/m <sup>2</sup>		

表-20 促進載荷前後の路面性状調査結果

路面性状調査結果	FWD たわみ量 (μm)	路面平坦性 (3mプロフィール)		路面平坦性 (慣性プロファイル)		すべり 抵抗値 (BPN)	すべり 抵抗値 (DFT)		わだち 掘れ量	表面形状 (MTM)		
		IWP	OWP	OWP	BWP		OWP	BWP		OWP	BWP	
		振動軽減型 舗装A (type1)	施工直後	564	1.96		1.28	2.35		2.34	65	0.503
	促進載荷後	527	2.29	2.17	2.84	2.96	65	0.593	0.607	2.1	0.19	0.18
振動軽減型 舗装A (type2)	施工直後	1204	1.24	1.54	1.89	1.92	60	0.398	0.380	2.3	0.72	0.71
	促進載荷後	1057	1.53	2.79	3.26	1.95	67	0.548	0.520	7.5	0.68	0.69
振動軽減型 舗装B	施工直後	1683	1.46	0.92	2.23	2.00	82	0.535	0.682	1.7	0.42	0.46
	促進載荷後	1798	1.44	1.26	2.94	2.67	57	0.248	0.338	3.3	0.41	0.38
振動軽減型 舗装C	施工直後	1148	1.95	1.74	2.04	2.10	72	0.258	0.245	-	0.80	0.67
	促進載荷後	1367	1.84	1.94	2.50	2.05	69	0.625	0.403	1.4	0.73	0.65
密粒度舗装	施工直後	555	1.96	2.37	2.44	2.54	71	0.502	0.547	2.0	0.20	0.25
	促進載荷後	599	2.69	2.81	2.53	3.42	67	0.542	0.600	7.5	0.18	0.22

加振源は後軸重 117.6kN の大型車による走行とした。振動測定位置は工区中央の 18m 地点とし、各測定位置における振動ピックアップの設置場所は図-22 に示す 3ヶ所とした。

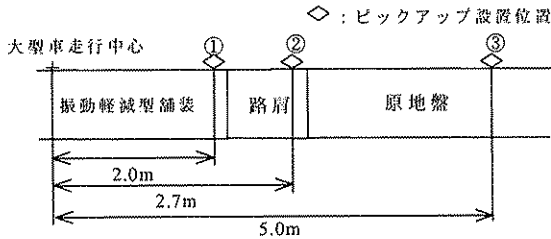


図-22 振動測定位置

#### 4.2.2 振動測定結果

大型車(後軸重 117.6kN)が走行した時の振動測定結果の一部を図-23に、図-23と同条件で測定点①における各振動レベルの周波数分析結果を図-24に示す。なお振動測定結果は振動レベルピーク値を用いた<sup>7)</sup>。図-23より、今回使用した振動軽減型舗装は密粒舗装に比べて、2dB程度の振動軽減効果があることが確認された。また、測定点①から測定点②にかけての振動軽減効果は、密粒舗装に比べて振動軽減型舗装 A(Type1)・B が大きいことがわかる。これは舗装体自体の振動を軽減する性能が高いだけでなく、外部に伝搬する振動を軽減する性能も高いことを示している。なお舗装体自体で振動をかなり軽減する振動軽減型舗装Cの測定点③において、測定点①・②より大きな値が出たのは手前の工

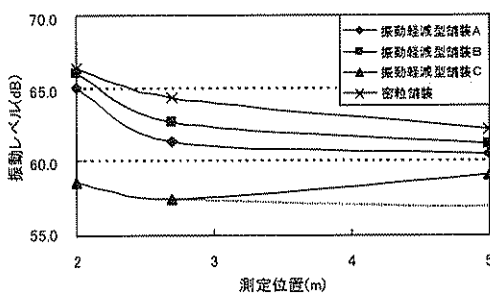


図-23 振動レベルの測定結果

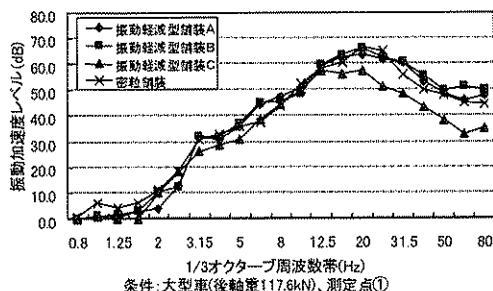


図-24 周波数分析結果

区の影響を受けたためと考えられる。また図-24の結果より、各舗装は 20Hz 付近で周波数が卓越していることがわかる。なお、車軸はバネ下の固有振動数として 20Hz 付近で主に振動していると言われており、この周波数帯域で評価することが適当であると考えられる。

#### 4.3 開発した低振動舗装の振動低減効果の評価

##### 4.3.1 実験方法

表-19に示す4種類の振動軽減型舗装と比較工区として設けた密粒度舗装の計5種の舗装(工区長 36m×4)を用いて振動測定を行った。実験方法は4.2.1と同様とした。

##### 4.3.2 実験結果

###### 1) 振動測定結果

5種類の舗装において、荷重車を走行させて振動測定を行った結果の一例(荷重条件: 117.6kN)を示す。促進載荷試験前および後の振動測定結果を図-25、26にそれぞれ示す。

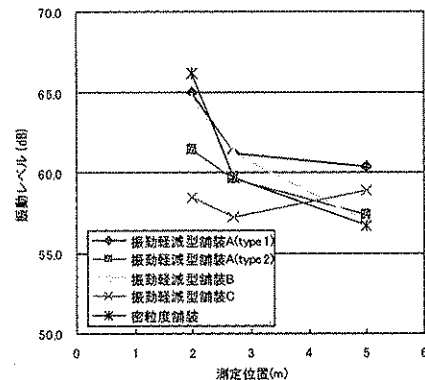


図-25 振動測定結果(促進載荷試験前)

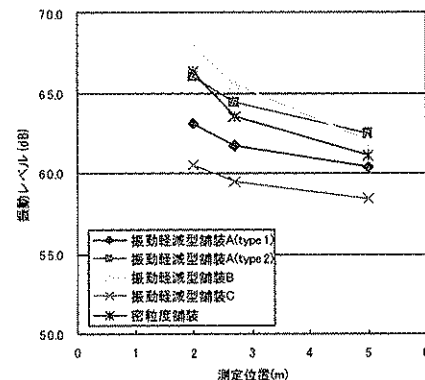


図-26 振動測定結果(促進載荷試験後)

振動軽減型舗装 A(type1)では、促進載荷試験前後で振動レベルの変化が小さいことが分かった。振動軽減型舗装 A(type1)は平坦性確保を開発目標としており、舗装の平坦性があまり悪くならなかった結

果、促進荷重試験前後での振動レベル値の変動が少なかったと考えられた。振動軽減型舗装 A(type2)について、促進荷重試験前では多少の振動軽減効果が確認できたが、促進荷重試験後では密粒度舗装とあまり変わらない振動レベル値であることが確認された。振動軽減型舗装 B については、促進荷重試験前では密粒度舗装に比べて振動軽減効果が確認されたが、促進荷重試験後ではほとんど密粒度舗装と変わらない振動レベル値を示したことがわかった。振動軽減型舗装 C については、促進荷重試験前後ともに密粒度舗装に比べてかなり大きな振動軽減効果が確認された。

また、測定点③ (5m 地点) での振動レベル値が促進荷重試験前後においてかなり異なっていることがわかる。これは、5m の測定地点は土上にピックアップを設置しているため、土中水分の状態の違いの影響によりこのような傾向になったと考えられた。

2) 振動軽減効果

密粒度舗装で発生する振動レベルと各種振動軽減型舗装で発生する振動レベルの差を振動レベル軽減値として、比較検討を行った。各測定点別の振動軽減値についての一例 (117.6kN 時) を図-27、28 に示す。測定点②と測定点③における、密粒度舗

装に対する振動レベル軽減効果の評価が様々に変わった。これは測定箇所が路肩部および土部のために、構造的安定性不足や含水比など外的要因が影響したためと考えられた。そこで振動軽減型舗装上にて測定を行った測定点①における結果を基に各振動軽減型舗装の検討を行った。振動軽減型舗装 A(type1)は、促進荷重試験前に比べて促進荷重試験後の振動レベル軽減値が高いことがわかった。これは路面平坦保持能力が高いためと考えられた。振動軽減型舗装 A(type2)は、振動レベル軽減値は正の値を示すが、促進荷重試験前の方が特に振動軽減値が良いことがわかった。振動軽減型舗装 B は、促進荷重試験前は振動軽減効果があるものの、促進荷重試験後はほぼ密粒度舗装と同じ値を示すことがわかった。振動軽減型舗装 C は、6~8dB 程度の振動軽減効果を有することがわかった。促進荷重試験前後により振動軽減効果が多少失われるが、ほぼ変わらなかった。振動軽減型舗装上である測定点①において、振動軽減効果が高いことから、各振動軽減型舗装が振動軽減効果を有していることが確認された。

#### 4. 4 低振動舗装開発のまとめ

振動測定結果から、開発した振動軽減型舗装が振動軽減に有効な舗装であることが確認された。

#### 5. まとめ

本研究の結果、コストを考慮した適切な排水性舗装の機能回復手法を提案できた。また、振動軽減効果がある 3 種類の舗装技術を開発した。

#### 参考文献

- 1) 近藤、大西、石川：排水性舗装の経時および累積交通量による騒音低減効果の変化について、日本音響学会講演論文集、1999.3
- 2) 小柴、森、並河：排水性舗装の減音効果の経時変化について、第25回日本道路会議論文集、2003.11
- 3) 田中、内田、服部：排水性舗装に関する追跡調査（九州地建の事例）（下）、舗装、2000.3
- 4) 橋本、吉田、新田：路面性状からのタイヤ/路面騒音の予測に関する検討、舗装工学論文集、第7巻、2002.12
- 5) 田中、内田、服部：排水性舗装に関する追跡調査（九州地建の事例）（下）、舗装、vol.35(3)、2000.3
- 6) 国土交通省関東地方整備局東京国道事務所：平成13年度低騒音舗装維持清掃方法の検討業務報告書、2002.3
- 7) 徳永、前川、西村、日野：道路交通振動の実態に即した評価のあり方に関する考察、土木学会論文集、No.615 VII-10、1999.2

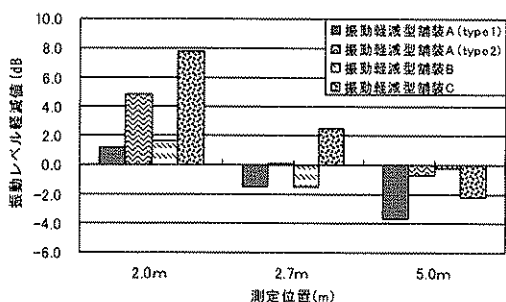


図-27 振動レベル軽減値 (促進荷重試験前)

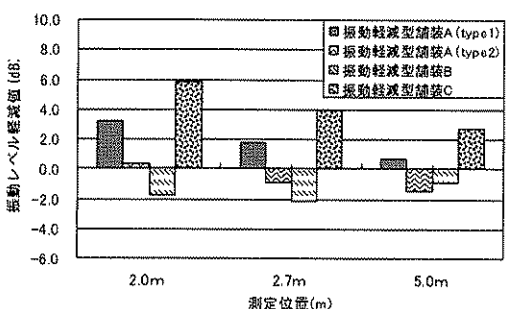


図-28 振動レベル軽減値 (促進荷重試験後)