

大型交通量の多い車道へ適用された透水性舗装の各種特性の経年変化に関する研究

大西有三¹・矢野隆夫²・西山 哲³・山本 剛⁴・和田 実⁵・宮崎幸雄⁶

1 正会員 工博,Ph.D 京都大学大学院 教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
ohnishi@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

2 正会員 博士(工学) 京都大学大学院 技術専門職員 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

3 正会員 博士(工学) 京都大学大学院 助教授 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

4 正会員 国土交通省近畿技術事務所 所長 (〒573-0166 枚方市山田池北町 11-1)

5 非会員 経済学修士 国土交通省近畿技術事務所 副所長 (〒573-0166 枚方市山田池北町 11-1)

6 非会員 国土交通省近畿技術事務所 技術課技術第二係長 (〒573-0166 枚方市山田池北町 11-1)

1. はじめに

近年 都市環境問題としてヒートアイランド現象¹⁾が注目されており、その対策として、各都市で打ち水大作戦²⁾が盛んに行われている。これは市民参加型の行事であり、打ち水の蒸発によって都市の気温を2 程度下げることで都市の熱環境を改善しようという試みである。

ヒートアイランド現象とは都市周辺と比較して都市部の気温が高くなるという現象であり、その原因として、エネルギー消費の増大に伴う人工排熱の増加、熱容量の大きな構造物による夜間の熱の放出、アスファルト舗装などの人工被覆面の増加に伴う蒸発散の減少などが考えられるが、その中でもアスファルト舗装が都市環境悪化に大きく関与していることが指摘されている³⁾。

アスファルト舗装された道路は、人や物が安全、快適、迅速に移動させるための交通施設である。従来のアスファルト舗装はその耐久性を向上させるために水密性に優れた構造とし、路盤や路床に雨水が侵入することを防ぐことを基本として進歩してきた。そのため、都市環境に関しては豪雨時の都市型洪水の発生やヒートアイランド現象の要因になっており、車の走行性に関しては降雨時のハイドロプレーニング現象、スモッキング現象が発生する要因にもなっている。それらの事柄を受け、都市環境改善の対策工法として透水性舗装⁴⁾が注目されつつあ



図-1 調査箇所

る。

透水性舗装は透水性の高いアスファルトを使った舗装であり、高機能舗装とも呼ばれるものである。高機能舗装は透水性舗装以外にもいくつかあり、排水性舗装および保水性舗装などに分類される。排水性舗装は透水性の高い表層から流れ込んだ雨水を中間の不透水層より道路の側面にある排水溝に誘導する形式がとられており、不透水層より下には雨水は浸透しない。保水性舗装は表層に保水性材料を混合し、雨水を表層に蓄えることのできる舗装であるが排水性舗装と同様に雨水は地下には涵養

CL	走行車線	標準舗装 第1工区	透水性舗装 第2工区	透水性舗装 第3工区	透水性舗装 第4工区	透水性舗装 第5工区	透水性舗装 第6工区	透水性舗装 第7工区		
	追越車線	至和歌山 (下り)						至奈良 (上り)		
		KP126.085 ● KP126.060			● KP125.910		中央分離帯		KP125.735	
CL	追越車線									
	走行車線	至和歌山 (下り)								
深さ z (mm)	0	← 50.0m → ← 50.0m → ← 50.0m → ← 50.0m → ← 50.0m → ← 50.0m → ← 50.0m →								
	表層 (密粒度)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)	表層 (透水性13)
	中間層 (粗粒度)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)	中間層 (透水性20)
	基層 (粗粒度)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)	基層 (透水性20)
	上層路盤 (AS処理)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)	上層路盤 (透水安定)
	下層路盤 (粒調碎石)	下層路盤 (切込碎石)	下層路盤 (切込碎石)	下層路盤 (切込碎石)	下層路盤 (AS再生碎石)	下層路盤 (AS再生碎石)	下層路盤 (AS再生碎石)	下層路盤 (AS再生碎石)	下層路盤 (AS再生碎石)	下層路盤 (AS再生碎石)
	下層路盤 (粒調碎石)									
	路床	路床	路床 ジ・行キスタイル	遮断層 保水層砂	遮断層 保水層砂	路床 ジ・行キスタイル	路床	路床	路床	路床
	500.0	施工年月日：平成5年7月 設計CBR=12.0%				路床	路床			
	600.0									
700.0										

図-2 試験舗装の内容と工種

しない。これに対し、透水性舗装は各層が透水性の高い材料から作られており、流れ込んだ雨水は表層、基層、路盤を介し路床へと涵養していく。

透水性舗装の目指す効果はその特徴をふまえて、前述した4つの現象の緩和以外に、水循環の保全、交通騒音の低減などが挙げられる。そこで著者らは期待される効果の内、都市型洪水抑止効果およびヒートアイランド現象の緩和に着目し、降雨強度などのパラメータを自由に設定できるような透水性舗装のモデルを構築して降雨実験を行った。その結果、都市型洪水抑止効果に関しては、全降雨量の少なくとも約60%程度のピークカットが期待できることを明らかにした⁵⁾⁻⁹⁾。また、ヒートアイランド現象の緩和に関しては、舗装からの水の蒸発に伴う潜熱移動によって、従来舗装に比べて日中で最大4℃、夜間においても1～2℃程度低減されることから、路面温度低減効果が期待できることを明らかにした⁵⁾⁽¹⁰⁾⁻¹²⁾。

一方、透水性舗装には上述した利点があるものの、車道部へ適用するには、路盤・路床の耐久性や舗装の目詰まりなどの問題を抱えており、笠原ら¹³⁾や田口ら¹⁴⁾によって透水性舗装材の耐久性に関する研究がなされているが、透水性舗装のメカニズムや耐久性を解明するための長期にわたる実証的な追跡調査は皆無である。そこで本研究では、国道24号和歌山バイパスに試験施工された透水性舗装の約11年半に及び追跡調査の結果を用いて、舗装構造としての耐久性や機能性に注目し、その効果を論じるものである。

2. 調査箇所および調査項目

試験施工箇所および調査箇所は図-1に示す和歌山県那賀郡岩出町吉田の国道24号和歌山バイパスである。供用

表-1 アスファルト混合物の配合と性状

		透水性舗装			標準舗装		
		表層	中間層・基層	上層路盤	密粒度AS(20)	粗粒度AS(20)	AS安定処理(25)
					表層	中間層・基層	上層路盤
骨材配合率 (%)	5号砕石	-	34.0	39.0	20.0	21.0	32.0
	6号砕石	84.0	50.0	44.0	28.0	35.0	24.0
	7号砕石	-	-	-	10.0	17.0	7.0
	スクリーングス	-	-	-	11.0	10.0	13.0
	砂	11.0	11.0	12.0	26.6	13.5	21.0
	石粉	5.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.0
	バインダー量(%)	5.1	5.0	4.5	5.2	4.6	4.0
混合物の性状	密度(kN/m ³)	19.591	19.679	19.640	22.936	23.632	23.073
	理論密度(kN/m ³)	24.545	24.594	24.800	24.417	24.721	24.898
	空隙率(%)	20.2	20.0	20.0	4.1	4.4	7.3
	飽和度(%)	33.1	32.9	30.3	74.7	71.1	55.5
	透水係数(cm/sec)	1.4×10 ⁻¹	1.8×10 ⁻¹	2.0×10 ⁻¹	-	-	-
	安定度(N)	510.0	492.0	466.0	1170.0	1064.0	829.0
	70-値(1/100cm)	25.0	27.0	23.0	28.0	30.0	25.0
	残留安定度(%)	90.0	89.0	86.0	-	-	-
	DS(回/mm)	3900	4700	2100	1855	-	-

表-2 調査項目

調査および試験項目	規格	数量	摘要	
路面調査関係	ひびわれ	スケッチによる方法	2520m ² 全工区	
	平坦性	3mプロファイルメータ	1400m 車線毎2測線(OWP・IWP)/工区	
	わだち掘れ	横断プロファイルメータ	28点 4定点/工区	
	たわみ量	FWD	28点	4定点/工区
		ベンケルマンビーム		
	すべり抵抗	DFテスター	56点	8定点(OWP・BWP)/工区
	現場透水量	舗装試験法便覧	48点	8定点(OWP・BWP)/工区
	騒音		2ヶ所	2定点/1, 4工区
	試料採取	舗装試験法便覧	14本	2定点/工区
室内試験	密度	かさ密度	56点 2定点・4層/工区	
	室内透水量	室内定水位	48点 2定点・4層/工区(標準工区は除く)	

開始は平成5年7月であり、建設当初、試験舗装工区は片側1車線の上下線を対象に各7工区設けられていたが、平成9年5月の拡幅工事によって図-2に示すように上下片側2車線となり、従来の上り線が現在の下り追越車線へと移行した。したがって、平成9年度より上り線の走行および追越車線が試験舗装調査の対象位置となっている。透水性舗装は図-2、表-1に示すように全6工区設けられており、表層から上層路盤までの4層が空隙率約20.0%の混合物で施工されている。舗装構造は図-2に示す

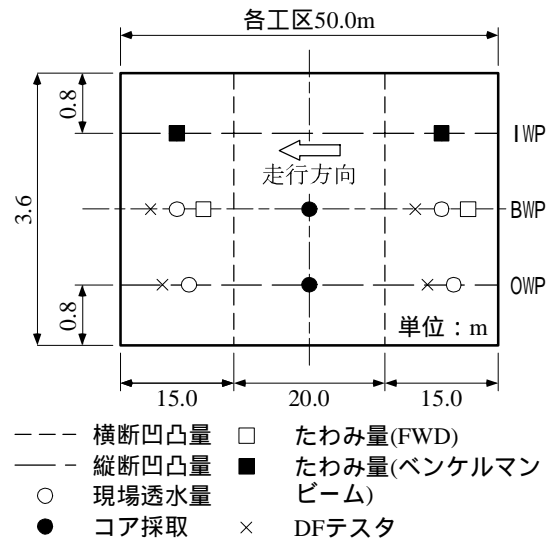


図-3 調査測定箇所

ようにその構造が路床へ与える影響を比較するため、下層路盤以下の舗装構成を変化させている。標準舗装(1工区)は透水性舗装の対比工区として隣接する箇所に設けられており、その舗装構造は近畿地方整備局の設計標準断面を用いている。透水性舗装は基本的に標準舗装のアスファルト層を透水性に変更したものである。2工区は下層路盤に切込砕石を用いており、3工区の舗装構造は2工区と同じであるが、路床は泥濘化などを防ぐためにジオテキスタイルを採用してある。4工区は下層路盤に切込砕石を用いており、路床保護のため遮断(保水)層として砂層を採用している。5工区は4工区の切込砕

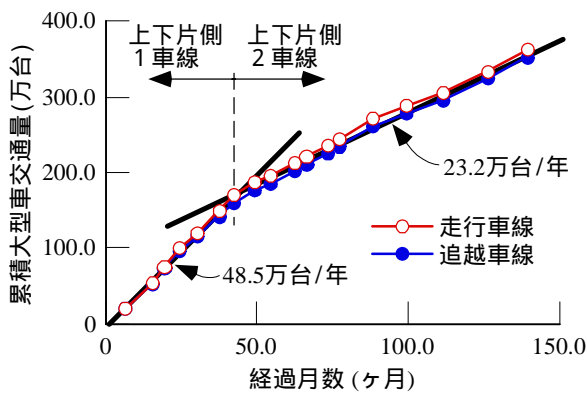


図-4 累計大型車交通量

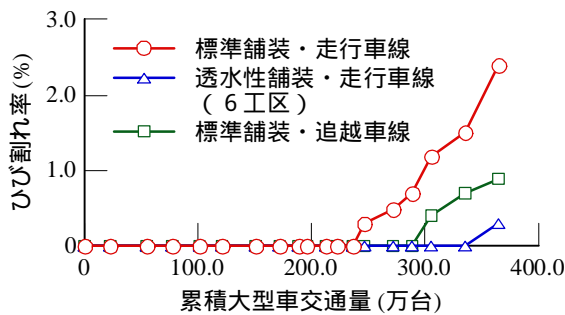


図-5 ひび割れ率

石をAs再生砕石に変更したものである。6工区は下層路盤にAs再生砕石を用いており、路床保護のためジオテキスタイルを採用してある。それに対し、7工区の舗装構造は6工区と同じであるが、路床保護のためジオテキスタイルを採用していない工区である。なお、路線状況は縦断勾配が0~2.5%程度であるがほぼ直線で平坦であり、当該路線において渋滞は見られずスム-ズな車両の流れであることが確認されている。

調査項目は表-2に示すように路面調査関係が8種類、室内試験としては2種類である。また、調査測定位置は図-3に示すように、舗装構造や下層路盤以下の舗装構成を比較検討するため、各舗装工区とも同じ位置となっている。

3. 調査結果

道路の求められる機能は安全性、快適性および耐久性である。安全性は表-2に示すすべり抵抗などから判断され、快適性に関しては平坦性や騒音などから確認される。耐久性はたわみ量から逆解析的に求められた弾性係数から評価される。また、透水性舗装の最も特徴的な機能である透水性は現場透水量や室内で実施される透水試験などによって確認される。よって、ここではまず初めに路

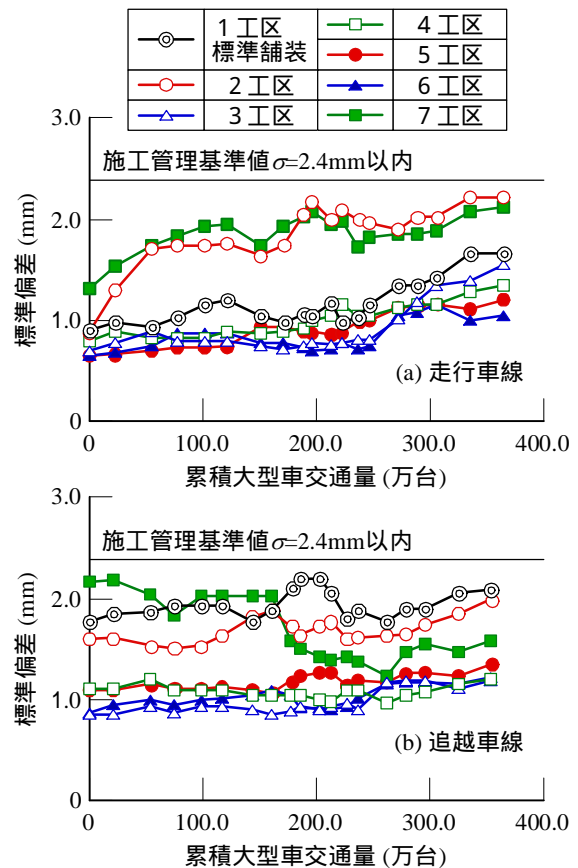


図-6 平坦性の経年変化

面調査結果を述べ、続いて室内試験結果を論じる。

(1) 路面調査結果

a) 累計大型交通量

国土交通省和歌山河川国道事務所の交通量調査結果を基に、試験舗装区間の供用開始からの累計大型車交通量を図-4に示す。供用開始後、拡幅工事までは年間約48.5万台程度の交通量であったが、拡幅工事後は一路線あたり年間約23.2万台程度で推移しており、今後もこの傾向で推移していくものと推測される。

b) ひび割れ率

ひび割れ率の測定は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「舗装路面のひび割れ測定方法」に準拠し、ひび割れ発生状況を縮尺1/200の図面にスケッチした。ただし、ひび割れ率の計算にあたり、試料採取に伴う復旧跡等はパッチング面積に含めないものとする。

ひび割れ率の経年変化を図-5に示す。現在までに、供用開始から約11年半経過したが、ひび割れの発生が確認されたのは標準舗装1工区の走行車線、追越車線および透水性舗装6工区の走行車線である。この図から明らかに、最もひび割れが確認された標準舗装の走行車線においても約2.4%程度のひび割れ率であり、道路維持修繕要綱¹⁶⁾に記載されている補修要否の判断目標値30.0~

経過月数	経過月数	経過月数
6ヶ月	42ヶ月	77ヶ月
15ヶ月	49ヶ月	88ヶ月
19ヶ月	54ヶ月	99ヶ月
24ヶ月	62ヶ月	111ヶ月
30ヶ月	66ヶ月	126ヶ月
37ヶ月	73ヶ月	139ヶ月

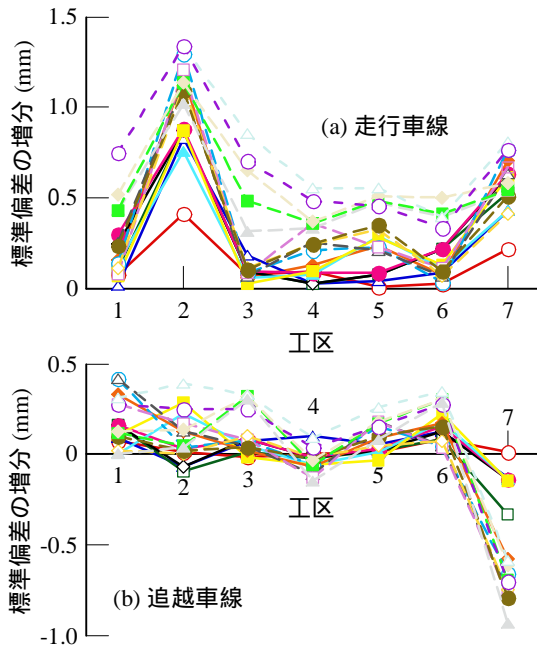


図-7 工区と平坦性の増分の関係

40.0%を大きく下回り良好な路面状態を維持していることがわかる。

c) 縦断凹凸量（平坦性）

縦断凹凸量（以下、平坦性と呼ぶ）の測定は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「舗装路面の平坦性測定方法」に準拠し、その測定方法は3mプロフィールメータによる方法である。計測位置は図-3に示すようにOWP、IWPであり、区間の始点から終点まで連続して測定した。

平坦性の経年変化を図-6に示す。平坦性は各工区とも若干の増加傾向があるものの、その標準偏差は施工管理基準（2.4mm以内）を満足しており良好な状態を維持していることがわかる。また経年における変化についても、標準偏差は大きな変動もなく推移していることから、今後もこの傾向で進行していくと推測される。

図-7に各工区の平坦性の増分を示す。この図からは、追越車線は7工区を除けばほぼ同じような挙動を示しているが、走行車線では工区、すなわち、工種によりその挙動が大きく異なっていることが確認できる。

まず初めに、路床の補強が平坦性に及ぼす影響を述べる。図-7(a)に示す走行車線に着目し、標準舗装（1工区）と透水性舗装（2工区）を比較すると、透水性舗装の方がその値は大きくなっていることがわかる。また、透水性舗装で路床にジオテキスタイルを設置した工区（3工

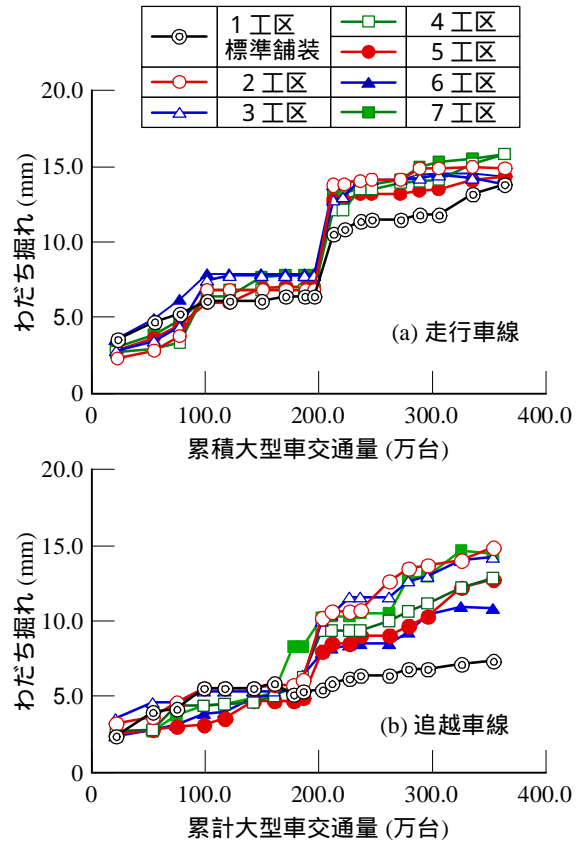


図-8 わだち掘れの経時変化

区）と未設置工区（2工区）を比較すると、未設置工区の方が大きな値を示していることが確認できる。しかし、標準舗装（1工区）と透水性舗装（3工区）を比較すると、ほぼ同じような値を示しており、このことから、路床はジオテキスタイルなどによって保護することが望ましいことがわかる。

次に、下層路盤の材料の違いが、平坦性に与える影響について述べる。下層路盤に切込砕石を採用した工区（2、3、4工区）とAs再生砕石を採用した工区（5、6、7工区）を比較すると、4工区と5工区はほぼ同じような値を示しているものの、一般的に切込砕石を採用した方が平坦性は大きな値を示していることがわかる。

よって以上の事柄は、舗装内に雨水を浸透させると路床を弱体化する可能性があるが、下層路盤にAs再生砕石などの最適な材料を採用し、路床をジオテキスタイルなどによって保護することで、ほぼ標準舗装と同等の耐久性が確保できることを示唆していると推察される。

d) 横断凹凸量（わだち掘れ量）

横断凹凸量（以下、わだち掘れ量と呼ぶ）の測定は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「舗装路面のわだち掘れ量測定方法」に準拠し、測定は横断プロフィールメータによる方法とした。計測位置は図-3に示した位置（単路部20.0m間隔）であり、OWP、IWPのわだち掘れ量を求め、その平均値を代表値とした。

経過月数	経過月数	経過月数
6ヶ月	42ヶ月	77ヶ月
15ヶ月	49ヶ月	88ヶ月
19ヶ月	54ヶ月	99ヶ月
24ヶ月	62ヶ月	111ヶ月
30ヶ月	66ヶ月	126ヶ月
37ヶ月	73ヶ月	139ヶ月

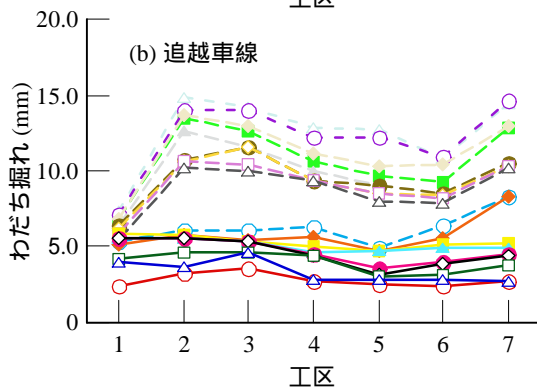
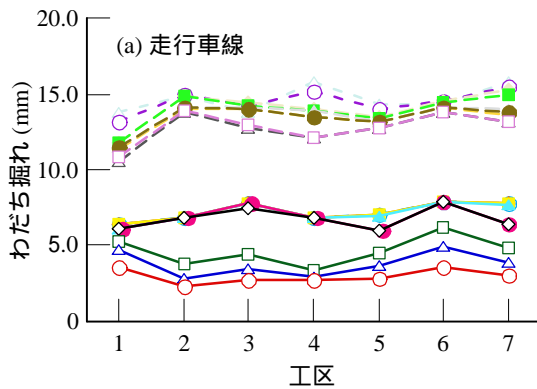


図-9 工区とわだち掘れ量の関係

図-8にわだち掘れ量の経年変化を示す。この図からは、各工区のわだち掘れ量は2.0～16.0mm程度の範囲で分布しており、道路維持修繕要綱⁶⁾に記載されている補修要否の判断目標値30.0～40.0mm以内を下回り良好な路面状態を維持していることがわかる。

各工区別のわだち掘れ量を図-9に示す。この図からは、走行車線では全工区とも同程度のわだち掘れ量を示しているものの、追越車線では工種によりその挙動が異なっていることが確認できる。追越車線において標準舗装と透水性舗装を比較すると、全体的に透水性舗装の方が大きな値を示しており、路床の保護状態や下層路盤の材料の違いを比較すると、平坦性と同様の傾向を示していることが確認できる。

e) たわみ量

ここでは、FWD たわみ量とベンケルマンピームによるたわみ量の計測結果を論じる。

FWDたわみ量は、FWD試験機を用いて路面のたわみ形状を測定した。測定方法の詳細については参考文献¹⁷⁾に譲る。たわみ量の測定は図-3に示す位置において3回測定し、1回目の測定値を棄却した後、2回目と3回目の

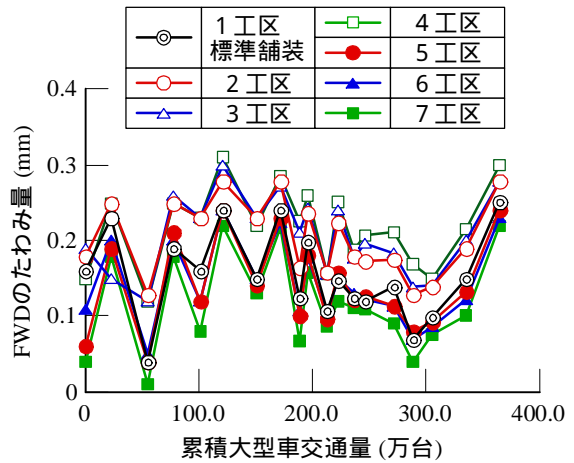


図-10 FWD たわみ量の経年変化

経過月数	経過月数	経過月数
施工直後	42ヶ月	88ヶ月
6ヶ月	49ヶ月	99ヶ月
15ヶ月	54ヶ月	111ヶ月
19ヶ月	62ヶ月	126ヶ月
24ヶ月	66ヶ月	139ヶ月
30ヶ月	73ヶ月	
37ヶ月	77ヶ月	

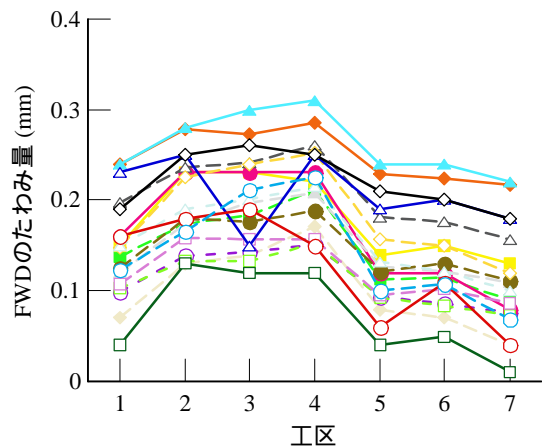


図-11 工区とFWD たわみ量の関係

測定値の平均をその位置の測定値とした。なお、温度補正後の値は、FWD運用マニュアル(案)¹⁸⁾に準拠し、各測点におけるたわみ量の平均値を20 に換算した値である。

図-10にFWDたわみ量の計測結果を示す。この図からは、たわみ量は各工区ともここ2～3年で若干の増加は見られるものの、大きな変動もなく推移していることがわかる。図-11に工区別のたわみ量を示す。透水性舗装各工区のたわみ量は、2, 3, 4工区のたわみ量が5, 6, 7工区のたわみ量より大きな結果を示した。この現象は、図-2に示すように透水性舗装2, 3, 4工区の下層路盤には切込砕石が使用されており、透水性舗装5, 6, 7工区はAs再生砕石が使用されていることから、下層路盤材料の違いに起因していると推察される。また、透水性

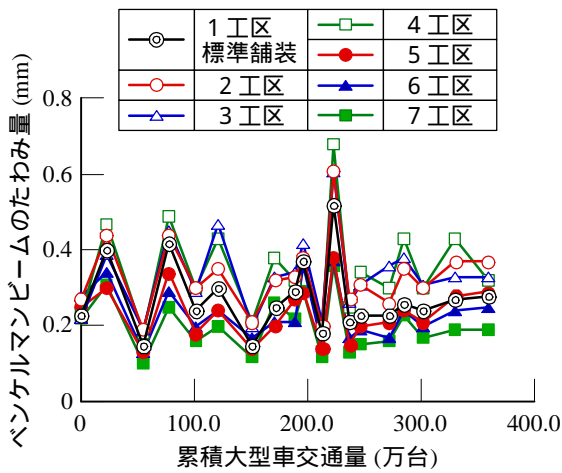


図-12 ベンケルマンピ - ムによるたわみ量の経年変化

経過月数	経過月数	経過月数
○ 施工直後	● 42ヶ月	■ 88ヶ月
▲ 6ヶ月	○ 49ヶ月	◆ 99ヶ月
□ 15ヶ月	△ 54ヶ月	◇ 111ヶ月
◇ 19ヶ月	▽ 62ヶ月	△ 126ヶ月
● 24ヶ月	◇ 66ヶ月	□ 139ヶ月
▲ 30ヶ月	● 73ヶ月	
■ 37ヶ月	△ 77ヶ月	

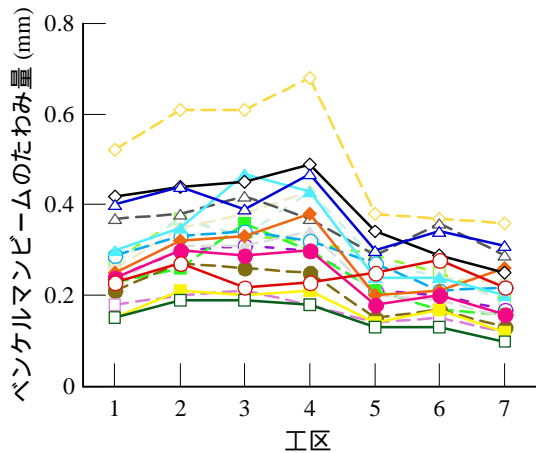


図-13 工区とベンケルマンピ - ムによるたわみ量の関係

舗装工区については下層路盤材料の違いがたわみ量に大きく影響することが明らかとなったが、標準舗装と透水性舗装との比較は、アスファルト舗装種別やアスファルト舗装厚などの条件の違いから一概に比べることは難しいと考えられる。よって、ここでは標準舗装と透水性舗装との比較を議論の対象にしない。

ベンケルマンピ - ムによるたわみ量測定は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「ベンケルマンピ - ムによるたわみ量測定方法」に準拠した。なお、たわみ量は道路維持修繕要綱¹⁶⁾における温度補正曲線を用いて温度補正を行ったものである。

ベンケルマンピ - ムによるたわみ量の計測結果を図-12に示し、図-13に工区別のたわみ量を示す。これらの図から、ベンケルマンピ - ムによるたわみ量は図-11に示

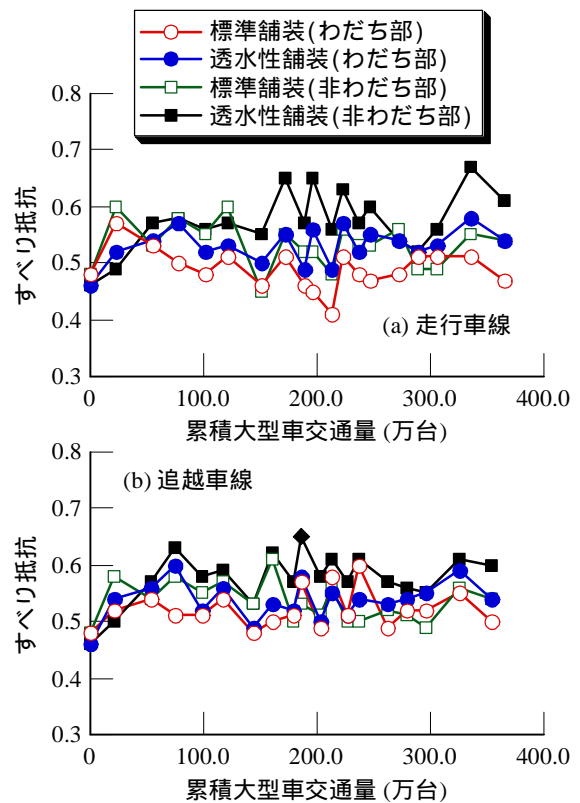


図-14 累計大型車交通量とすべり抵抗の関係

すFWDたわみ量と同じような挙動を示していることが確認でき、下層路盤材料の違いが大きく影響していることがわかる。

以上、たわみ量の経年変化について述べてきたが、近年のたわみ量には顕著な変動が無く、同程度を推移している。このことは、後述する現場透水量の経年変化と合わせて考えると、雨水等が舗装内に浸透することが少なく、支持力の低下が小さいことによるものと推察される。

f) 回転式すべり抵抗測定器によるすべり抵抗 (すべり抵抗)

回転式すべり抵抗測定器 (DFテスト) によるすべり抵抗 (以下、すべり抵抗と呼ぶ) の測定は舗装試験法便覧別冊¹⁹⁾の「回転式すべり抵抗測定器によるすべり抵抗の測定方法」に準拠した。計測は図-3に示す測定位置において各々3回湿潤状態で測定した。測定値は60.0km/hrのすべり抵抗として算出した。

図-14にすべり抵抗の計測結果を示す。この図から明らかのように、標準舗装と透水性舗装のすべり抵抗は0.5~0.6程度の範囲であり、路面のすべりとその対策²⁰⁾に示される日本における評価値0.4以上を、なおかつ、道路維持修繕要綱¹⁶⁾に記載されている補修要否の判断目標値0.25を大きく上回り、標準舗装、透水性舗装とも良好な路面状態を維持していることがわかる。また、すべり抵抗は、供用開始後から大きな変動はなく今後も0.5~0.6程度を維持していくものと推察される。

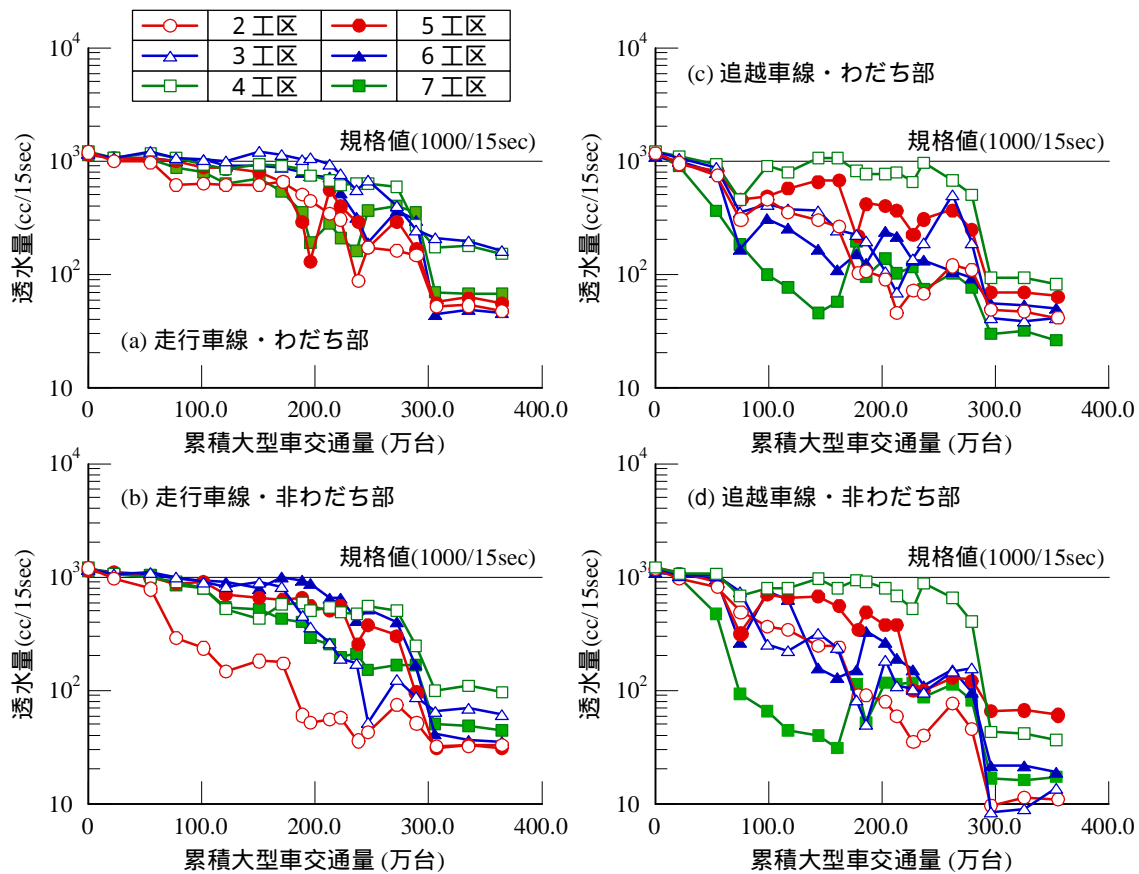


図-15 累計大型車交通量と現場透水量の関係

g) 現場透水量

現場透水量は舗装試験法便覧別冊¹⁹⁾の「現場透水量試験方法」に準拠し、図-3に示す位置で水400ccが透水する時間を測定した。なお、水400ccの基準位置は水頭目盛ゼ口の位置とし、水400ccの透水時間に120秒以上時間を要する場合は任意の時間内における透水量の変化を400ccの透水時間に換算し、15秒当たりの流下した透水量で評価した。

図-15に累積大型交通量と透水量の関係を示した。この図より、供用開始2年後(累積大型車交通量100万台程度)を境に大きく低下する傾向が確認され、近年においては走行車線、追越車線とも、各工区でのわだち部、非わだち部の透水量が最も透水する箇所においても約200cc程度であり、排水性舗装技術指針(案)²¹⁾の出来形合格判定値(1000/15sec以上)を大きく下回り透水機能を喪失している状況にあると言える。また、透水量はここ2~3年の調査結果と同程度であり、透水機能性は限界まで低下していると推察される。よって、透水性舗装に期待される効果、すなわち、都市型洪水抑止効果、水循環の保全や、走行車両による水はねや水しぶきの緩和、ハイドロプレーニング現象の緩和効果なども望めない状態にあることから、これらの効果を維持するためには、適切な時期に排水性舗装機能回復^{22,23)}による機能回復作業を行う必

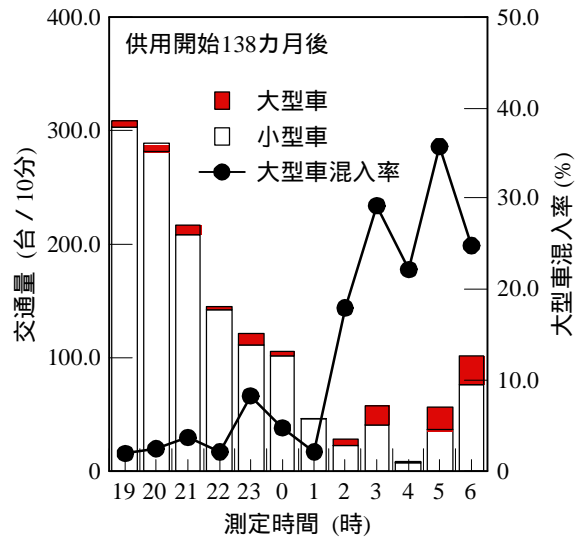


図-16 交通量の経時変化(供用開始後138ヶ月)

要がある。

h) 騒音

ここではまず初めに全体交通量調査結果を述べ、騒音測定結果を述べる。

全体交通量調査は騒音測定と同時に毎正時から1断面10分間(上下線)で通過車両台数を大型車類と小型車類

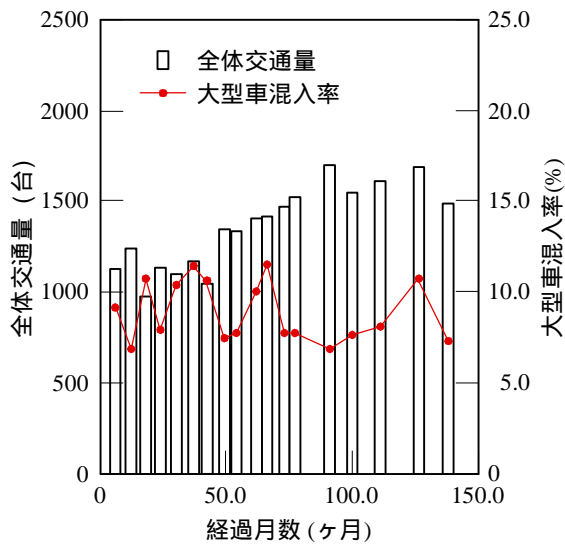


図-17 交通量および大型車混入率の経年変化

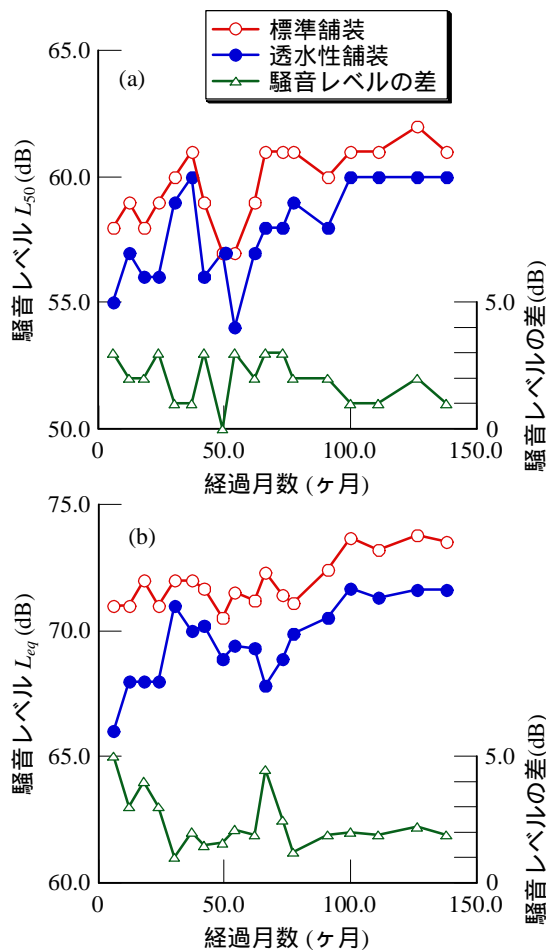


図-18 騒音レベルの経年変化

(大型車類とはバス(2), 普通貨物(1), 特殊車(8,9,0)であり, 小型車類は大型車類以外の車輛(バイクを除く)である)の2車種に分類して測定した。図-16に交通量の経時変化を示す。この図から, 当該調査路線の交通量は,

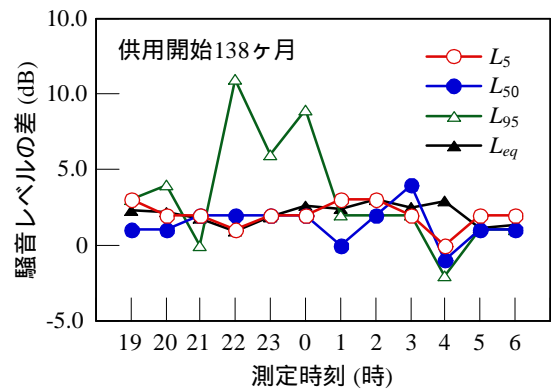


図-19 透水性舗装と標準舗装の騒音レベルの差

午前0時台から5時台にかけて交通量が減る傾向を示すと共に, 夜中の時間帯には大型車の交通量が多くなる傾向があることがわかる。全体交通量を図-17に示す。測定時間ごとの合計である全体交通量は約1500台程度であり, ここ数年の調査結果を見ても同程度である。よって, 今後も1500~1700台程度の交通量で推移していくものと推察される。また, 大型車混入率についても調査開始年度から今年度まで約10%前後で推移していることから, 今後も同程度の混入率で推移していくものと推測される。

次に騒音測定結果について述べる。測定箇所は図-2に示すように標準舗装(1工区)と透水性舗装4工区の2箇所である。測定方法はJIS Z 8731-1999に定める環境騒音の表示・測定方法によるものとし, 測定機器についてはJIS C 1502に定める普通騒音計, またはこれと同等以上の測定機器を用いた。なお, マイクロホンの設置箇所は図中印であり, 高さは1.2mである。騒音の測定は図-2に示す2地点同時に毎正時10分間のA特性音圧レベルをデータレコーダに録音後, 5秒間隔100個の統計処理を行い, 中央値(L_{50}), 90%レンジ上端値(L_5), 下端値(L_{95})および等価騒音レベル(L_{eq})を算出した。また, JIS C 1513に定める1/3オクターブバンド分析器を用いて同時に周波数分析も行っている。図-18に騒音レベルの経年変化を示す。この図から明らかなように, 騒音レベルは経年による増加が見られるものの, 透水性舗装では全ての測定時期で騒音レベル中央値(L_{50}), 等価騒音レベル(L_{eq})とも2.0~3.0dB程度小さくなっており, 騒音低減効果が確認できる。

図-19に供用開始138ヶ月後の標準舗装と透水性舗装の騒音レベルの差を示す。自動車騒音の評価値である騒音レベル中央値(L_{50})で標準舗装を基準として透水性舗装と比較をすると, 4時台では標準舗装が低い値を示したものの, 他の時間帯では透水性舗装の方が小さい騒音レベルを示していることがわかる。現在の環境基準での評価値である等価騒音レベル(L_{eq})については, 測定時間ごとで0.9~3.0dBの範囲で標準舗装と透水性舗装に差があり, 全ての測定時間で標準舗装より透水性舗装の方が騒音レベ

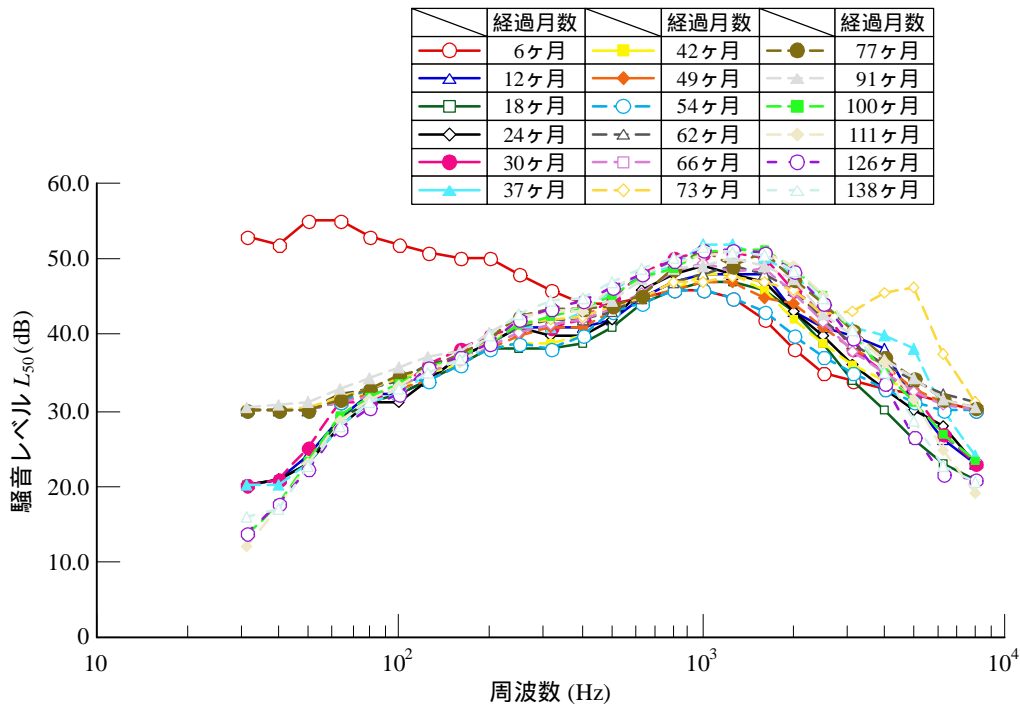


図-20 透水性舗装の騒音レベルの経年変化

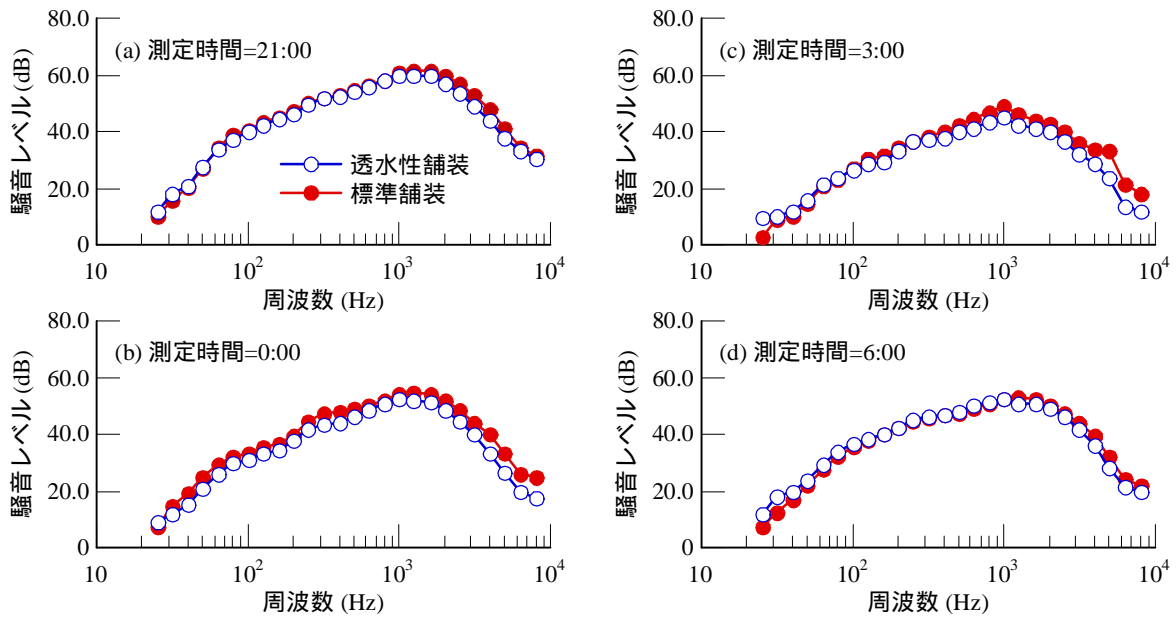


図-21 騒音レベルの1/3オクタ - プ周波数分布

ルは低くなっていることが読み取れ、騒音レベルの90%レンジ上端値(L_5)についてもすべての測定時間で透水性舗装の騒音レベルが小さいことがわかる。また、90%レンジ下端値(L_{95})では、4時台では透水性舗装の騒音レベルが大きい値を示したが、他の時間帯では低い騒音レベルを示していることがわかる。以上のことから、供用開始後138ヶ月経過の透水性舗装においても、騒音低減効果が維持されていると推測できる。

図-20に透水性舗装の騒音レベル中央値(L_{50})の経年変化を示す。この図からは、透水性舗装の騒音レベルの経年変化をみても大きな変動はなく、同程度の水準を維持していることがわかる。

供用開始138ヵ月後の騒音レベル中央値(L_{50})をオクタ - プ周波数分析した結果を図-21に示し、周波数分析による騒音レベルの差の経年変化を図-22に示す。これらの図からは、測定時間ごとの周波数特性においても人間が敏

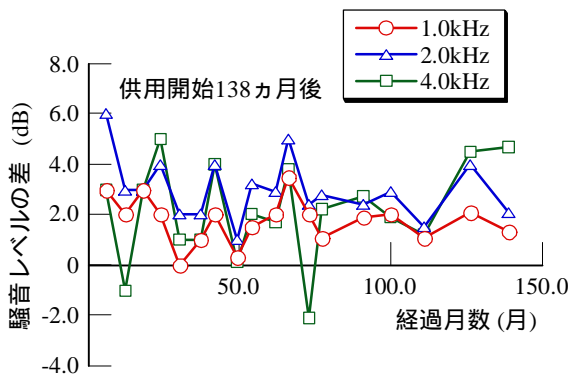


図-22 周波数分析による騒音レベルの差の経年変化

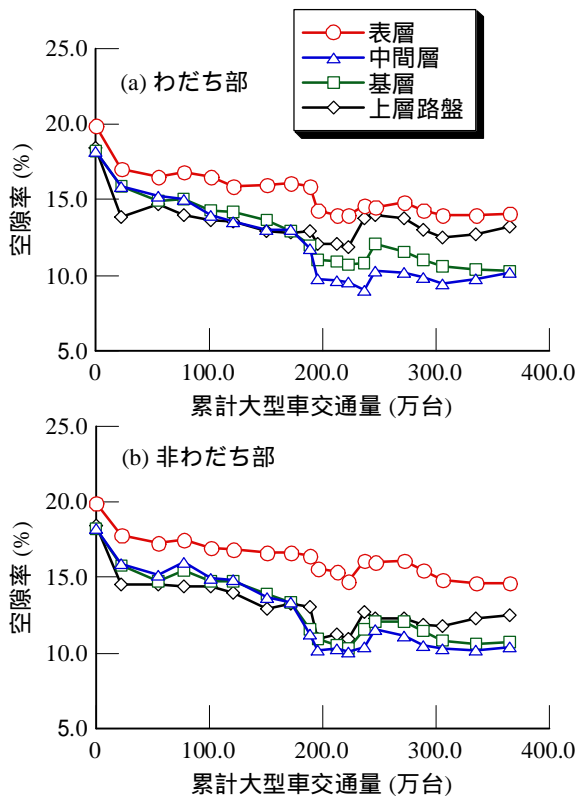


図-23 累積大型車交通量と層別空隙率の関係

感に感じる周波数帯である1.0kHz~2.0kHzで、どの時間帯も標準舗装より透水性舗装の騒音レベルが小さい傾向を示していることから、周波数分析における騒音レベルについても透水性舗装の騒音低減効果が確認できる。

(2)室内試験結果

前述したように、現場透水量は年を経るごとに減少していき、透水性舗装としての機能を喪失していることは明らかである。そこで、透水性舗装材料としての機能喪失がどの位置でどのように進行していくかを解明する必要がある。よってここでは、現場で採取された試料を用いて行ったかさ密度試験結果から求めた空隙率と室内透

経過月数	経過月数	経過月数
○ 施工直後	◇ 42ヶ月	■ 88ヶ月
△ 6ヶ月	○ 49ヶ月	◇ 99ヶ月
□ 15ヶ月	△ 54ヶ月	◇ 111ヶ月
◇ 19ヶ月	◇ 62ヶ月	◇ 126ヶ月
● 24ヶ月	◇ 66ヶ月	◇ 139ヶ月
▲ 30ヶ月	● 73ヶ月	
■ 37ヶ月	▲ 77ヶ月	

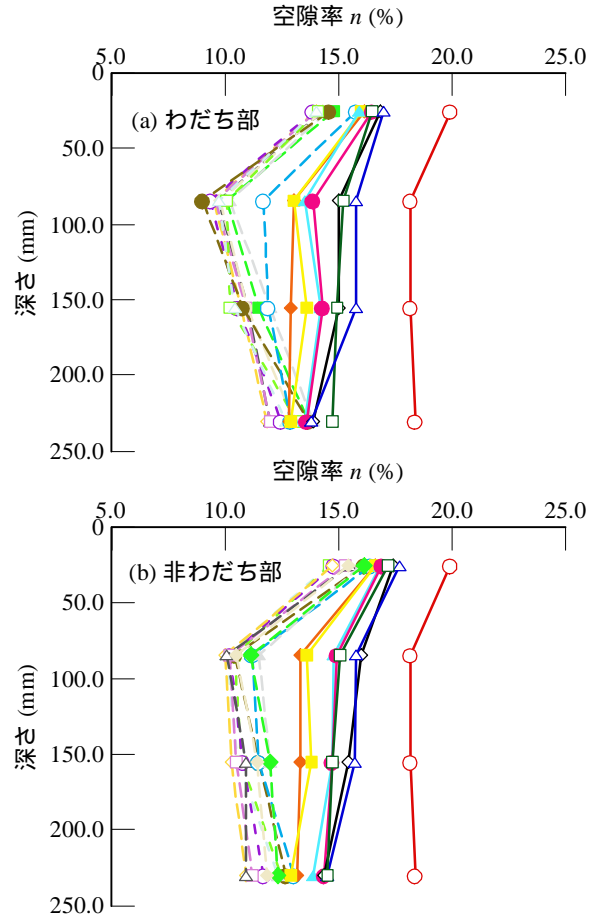


図-24 各深度の空隙率

水試験結果について論じる。

試料採取方法は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「アスファルト舗装の切り取りコア採取方法」に準拠した。試料採取箇所は図-3に示す位置で、コアカッターを用いてφ100.0mmのコアを採取した。なお、コア採取跡は加熱アスファルト混合物でタンパを用いて入念に締め固めを行い復旧した。

a)空隙率

アスファルト混合物の空隙率は透水性舗装の機能にとって重要な要素であり、かさ密度と理論密度から算出される。かさ密度を求める試験方法は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「透水性アスファルト混合物の密度試験方法」に準拠し、ノギスによる方法とした。供試体はコンクリートカットにより測定対象となる層(表層、中間層、基層および上層路盤)に切断し、自然乾燥させた後、直径と厚さおよび質量を測定してかさ密度を求めた。

空隙率はかさ密度と理論密度との比から次式のように

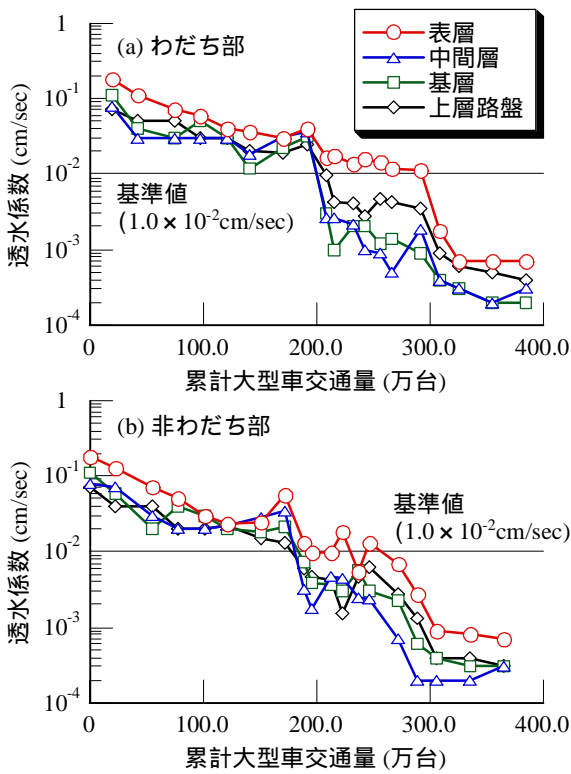


図-25 累積大型車交通量と透水係数の関係

与えられる。

$$n = (1 - \frac{\rho_b}{\rho_t}) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 n は空隙率、 ρ_b はかさ密度であり、 ρ_t は理論密度である。

図-23 に空隙率の経年変化を示す。空隙率はわだち部、非わだち部とも年を経ると共に減少していることが確認できる。その要因としては空隙が土砂等によって塞がれることや、交通荷重により押しつぶされる、いわゆる空隙つぶれが考えられる。また、ここ2～3年の空隙率の変動に着目すると、その値は大きな変動がなく推移していることから、空隙の目詰まり、もしくは空隙つぶれがほぼ終息していることがわかる。図-24 に深さと空隙率の関係を示す。この図からは、経年と共に上層路盤から順番に空隙率が小さくなるものの、最終的には中間層の空隙率が最も小さく、中間層での空隙詰まりが他の層より大きいことがわかる。このことから、ポーラスなアスファルト混合物において、中間層に相当する深さ7.0～12.0cmで空隙詰まりが生じやすいと推察される。また、中間層のわだち部と非わだち部を比較すると、わだち部の空隙率が小さくなっていることが読み取れる。ここで、土砂等による目詰まりが両部で同程度であると仮定すると、わだち部における空隙つぶれが非わだち部より大き

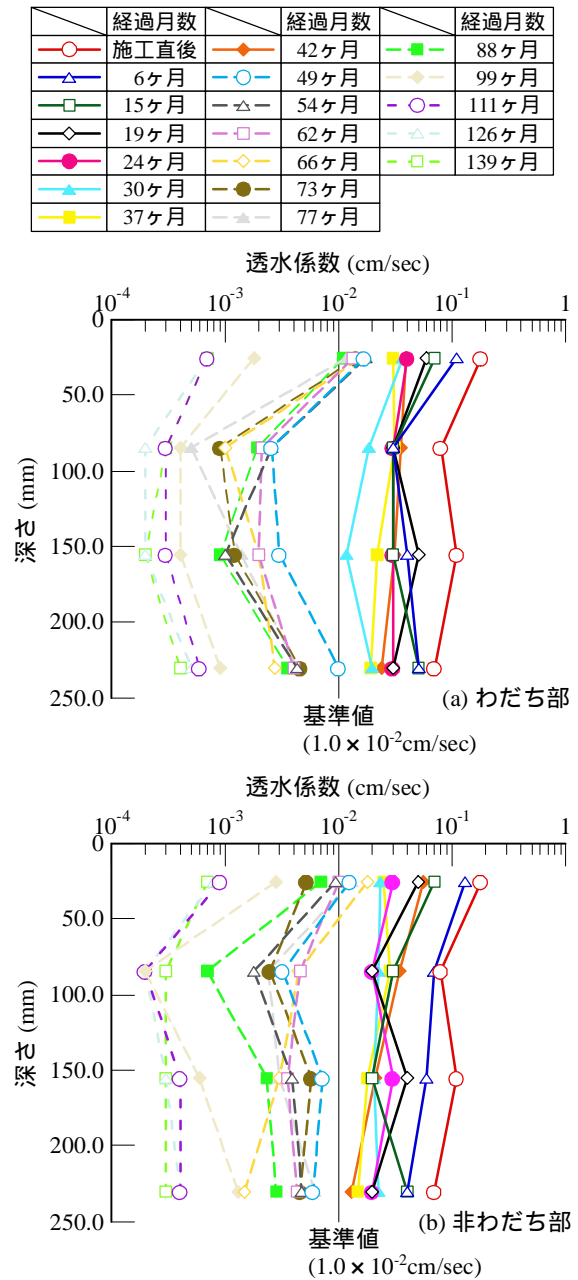


図-26 各深度の透水係数

くなっている可能性がある」と推察される。

b) 室内透水試験

室内透水試験は舗装試験法便覧¹⁵⁾の「透水性アスファルト混合物の透水試験方法」に準拠し、水温15℃に相当する透水係数として整理した。

図-25に透水係数の経年変化を示し、深さと透水係数の関係を図-26に示す。ただし、透水係数は透水性舗装全区を平均したものである。この両図からは、供用開始後30ヶ月までは透水性舗装の性能指標である基準値の $1.0 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ を上回っているものの、年を経るごとに透水性が悪くなっていくことがわかる。特にここ2～3年の透水係数は、わだち部、非わだち部とも、平均で約 $4.0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 程度で基準値を大きく下回っていることが

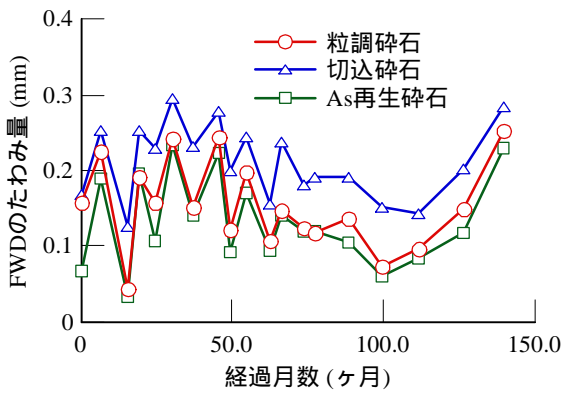


図-27 下層路盤別のFWDたわみ量の経年変化

確認できる。また、近年における透水係数は同程度の値を推移していることから、現場透水量でも述べたように、透水機能が限界点まで低下しており、その機能が喪失しているものと推察される。

4. 性能評価

透水性舗装が大型交通量の多い箇所へ導入されるには性能評価を行う必要がある。そこでここでは前述した調査結果を用いて舗装構造物としての性能評価を論じる。

(1) 構造に関する評価

a) たわみ量による各工区の断面の評価

路盤層における下層路盤材料は、大きく分けて1工区の標準舗装では粒調碎石が用いられており、2～4工区の透水性舗装では切込碎石が、5～7工区はAs再生碎石が採用されている。3.(1),e)で説明したたわみ量において、この下層路盤材料の違いが大きく影響することを明らかにした。ここでは逆解析手法によって算出した弾性係数や等価換算係数を用いて舗装構造物の評価を論じる。なお、本研究で用いた逆解析手法は多層弾性理論から導かれた松井ら²⁴⁾の方法を用いた。また、たわみ量としてはFWDたわみ量を用いるものとする。

まず初めに、たわみ量を下層路盤材料別に切込碎石は2～4工区の平均値として、As再生碎石は5～7工区の平均値として再整理した。その結果を図-27に示す。供用開始後139ヶ月後の平均たわみ量は、1工区の平均たわみ量を100%とした場合、その他の工区の平均たわみ量の比率は、切込碎石で約137%、As再生碎石で約86%となっており、下層路盤材料の違いがたわみ量に大きく影響することが再確認できる。

図-28に経過月数と弾性係数および等価換算係数の関係を示す。供用開始139ヶ月後の粒調碎石の弾性係数は、低下傾向にあるものの、等価換算係数は約0.23であり、舗

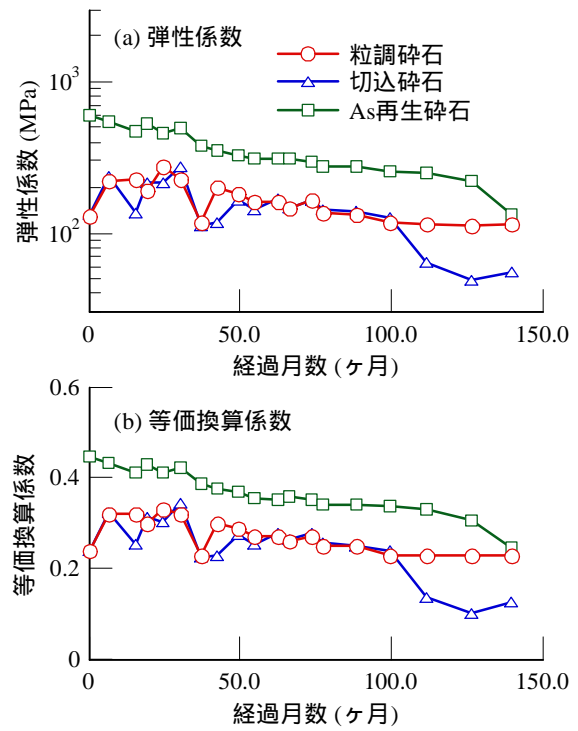


図-28 FWDたわみ量の逆解析による弾性係数

表-3 弾性係数の変動範囲²³⁾

	弾性係数(MPa)
アスファルト層	4905 ~ 17658
As安定処理層	1570 ~ 8829
上層路盤	294 ~ 883
下層路盤	128 ~ 329
路床	25 ~ 128

装設計施工指針²⁵⁾に記載されている下層路盤の修正CBR20以上30未満の材料に相当する0.20を上回り、支持力を維持していることがわかる。それに対し、切込碎石の弾性係数は他の工区と比較すると低下率が大きく、等価換算係数においても約0.13程度と下層路盤材としての支持力を維持していない状態にあり、表-3の下層路盤に対する弾性係数の変動範囲²⁶⁾をみても、かなり低下していることを示している。また、As再生碎石の弾性係数は、他の工区と同様に低下傾向にあるものの、等価換算係数は約0.25であり、下層路盤としては修正CBR30以上の材料に相当する支持力を維持していることがわかる。

b) アスファルト混合物層の評価

標準舗装には密粒度のアスファルト混合物が用いられ、透水性舗装には開粒度のアスファルト混合物が採用されている。ここではその材質の違いが弾性係数に如何に影響を及ぼすかを論じる。

図-29にアスファルト混合物の経過月数と弾性係数の関係を示す。この図から、ここ2～3年のアスファルト

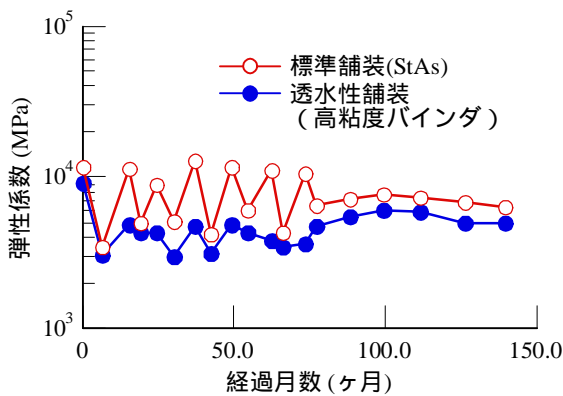


図-29 逆解析による弾性係数の経年変化 (アスファルト混合物)

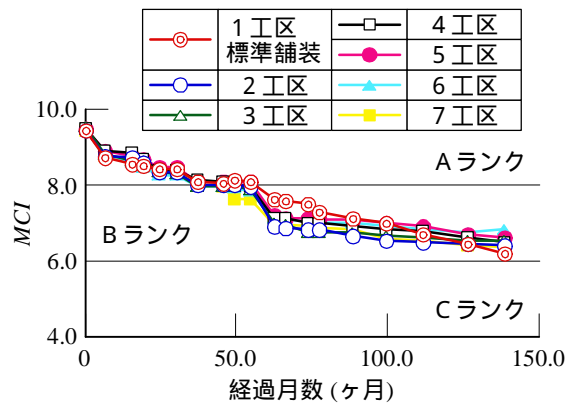


図-31 各工区のMCIの経年変化

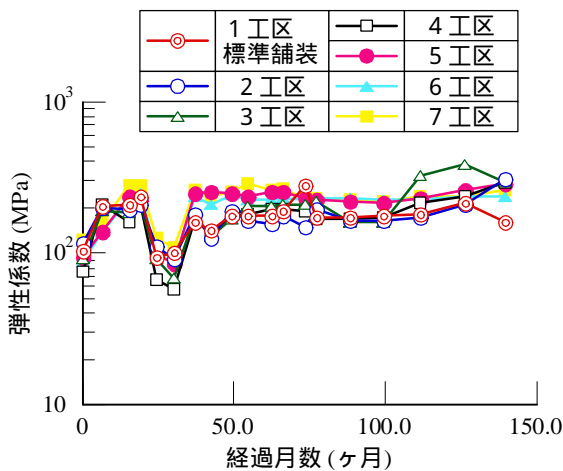


図-30 路床の弾性係数の経年変化

混合物の弾性係数は、標準舗装と透水性舗装に若干の差が見られるものの、約5394～6867MPa程度であり、表-3に示すアスファルト層の弾性係数の変動範囲(4905～17658MPa)内であることからアスファルト混合物層の支持力としては問題ないと推察される。また、弾性係数としては、施工直後から標準舗装 (StAsを使用) のアスファルト混合物が透水性舗装 (高粘度バインダを使用) より大きい値となっており、密粒度のアスファルト混合物の方が、開粒度の混合物より弾性係数が大きくなる傾向にあるといえる。よって、アスファルト混合物の弾性係数は使用するアスファルトの性能より混合物の粒度組成が反映されていると推察される。

c) 路床の評価

3.(1),e)で述べたように、路床保護の有無がその挙動に大きく影響を及ぼす。ここでは路床の弾性係数の経年変化を論じる。

図-30に路床の経過月数と弾性係数の関係を示す。路床の弾性係数は、供用開始直後は大きく変動しているものの、ここ数年は各工区とも大きな変動はなく安定した値で推移している。また、透水性舗装工区の路床では、舗

装体からの雨水浸透による路床の支持力低下が懸念されるが、調査結果では施工直後から安定した支持力を維持しており、浸透水による影響は小さいと推察される。

(2) 供用性・耐久性の評価

a) 供用性の評価

道路の供用性の評価は路面のひび割れ率などから路面状態を総合的に判断して数値化される。一般的に、その評価方法はAASHOが開発したPSIと、国土交通省が独自に開発したMCIが広く用いられているが、本研究ではMCIを用いて路面の供用性を評価する。MCIはひびわれ率、わだち掘れ量および平坦性の3項目の路面性状結果から総合的に供用性を評価するが、路面状況に応じてひびわれ率とわだち掘れ量の2項目から評価とする場合、あるいはひびわれ率のみ、またはわだち掘れ量のみ1項目から評価とする場合がある。本研究では3項目全てによる評価と、2項目および1項目のみのMCIをそれぞれ算出し、その内の最低値を該当工区のMCIとした。なお、MCIの算出方法や評価区分については舗装試験法便覧¹⁵⁾の「付録1. 舗装供用性評価方法」に譲る。

経過月数とMCIの関係を図-31に示す。この図から明らかのように、MCIは年を経ると共に減少していくが各工区で大きな差は認められず、最終的な評価区分は全工区でBランク「いく分欠陥があるが、良好と見なされる」の評価となった。このように、MCIを低下させている原因としては、標準舗装 (1工区) はひびわれ率とわだち掘れ量であるのに対し、透水性舗装工区 (2～7工区) では、わだち掘れ量による影響が大きいと推測できる。

b) 耐久性の評価

道路の耐久性は等価換算厚 T_A から評価できる。等価換算厚 T_A は舗装各層の弾性係数や等価換算係数を多層弾性理論により逆解析的に求め、それらの値と層厚から決定できる。算出方法については参考文献²⁷⁾に譲る。

図-32に等価換算厚 T_A の経年変化を示す。この図から、切込砕石を採用した透水性舗装 (2～4工区) とAs再生

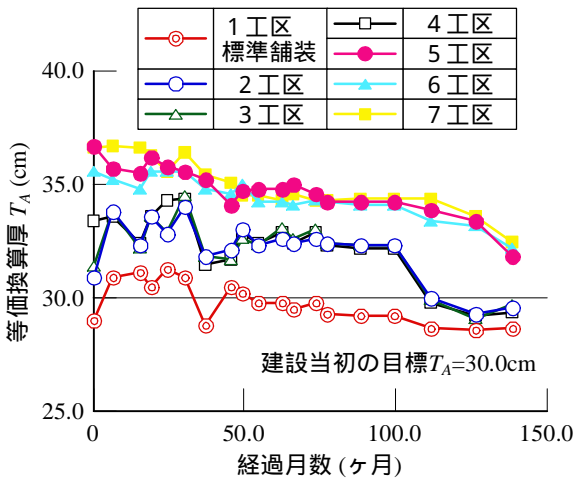


図-32 工区別等価換算厚 T_A の経年変化

砕石を採用した透水性舗装(5～7工区)を比較すると、 A_s 再生砕石を採用した工区の方が等価換算厚 T_A は大きくなっており、下層路盤材料の違いが等価換算厚 T_A に顕著に影響することが確認できる。また、各工区における等価換算厚 T_A は標準舗装と切込砕石を採用した透水性舗装(2～4工区)で昨年と同程度の値を示しているものの、 A_s 再生砕石を採用した透水性舗装(5～7工区)では若干の支持力低下が確認できる。しかしながら、全般的にその低下率は小さく、大きな支持力の低下に繋がっていないことがわかる。したがって、調査対象路線の建設当初の目標 T_A が30.0cm(設計CBR12.0%、D交通)であったことを考えれば、現状の透水性舗装5～7工区については必要な支持力を維持しているが、標準舗装および透水性舗装の2～4工区は支持力が若干不足していると推測される。

5. おわりに

本調査研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) ひびわれの発生については、標準舗装および透水性舗装6工区の走行車線で発生が確認されたが、経年における進行度合いも小さく、大きな破損には繋がっていないと推測される。
- (2) 各工区の平坦性は経年変化により若干の増加はあるものの、施工管理基準である標準偏差(2.4mm以内)を維持しており、舗装は良好であるといえる。路床の補強が平坦性に及ぼす影響を調べた結果、路床はジオテキスタイルなどによって保護することが望ましいことがわかった。また、透水性舗装工区において、下層路盤材料の違いが平坦性に与える影響を調べた結果、全般的に切込砕石を採用した方が平坦性は大きな値を示していることがわかった。よってこれらのことから、下層路盤に最適な材料を採用し、

路床を保護することで、ほぼ標準舗装と同等の耐久性が確保できると推察される。

- (3) わだち掘れ量は各工区とも大きな進行は見られず、今回の測定での最大値は15.8mmで、道路維持修繕要綱⁶⁾における維持修繕要否判断の目標値30.0mmを下回っており、健全な状態を維持しているものと推測できる。
- (4) 透水性舗装の透水能力を把握するために実施した現場透水試験では、各工区とも不透水の領域に近く透水機能を有していない状態である。
- (5) たわみ量については、FWDおよびベンケルマンピームによる2種類の測定方法により行ったが、測定機器の違いによるたわみ量の差はみられるものの、下層路盤材料別のたわみ量は切込砕石が最もたわみ量が大きく、次いで粒調砕石、 A_s 再生砕石の順で小さくなっている。
- (6) DF テスタによるすべり抵抗は、経年変化によるすべり抵抗の変動は少なく0.5～0.6程度であり、今後も同程度で維持していくものと推察される。
- (7) 騒音測定に関しては騒音レベルの等価騒音レベル(L_{eq})の比較において、供用開始138ヶ月後の透水性舗装は、標準舗装より平均で2.0～3.0dB程度小さく、透水性舗装の騒音低減効果が保持されていることが確認された。
- (8) 採取コアによる空隙率と透水係数は、中間層および基層の空隙率および透水係数の低下が著しく、ポーラスなアスファルト混合物において中間層に相当する深さ7.0～12.0cmでの空隙詰まりが生じやすいと推察される。
- (9) MCIに関しては、全工区でBランク「いく分欠陥があるが、良好とみなされる」の評価となった。
- (10) 等価換算厚 T_A による耐久性の評価では、設計当初の $T_A=30.0$ cm以上を満足している工区として透水性舗装5～7工区が該当し、その他工区に関してはやや下回る結果となった。これは下層路盤材料の支持力の違いが顕著に現れた結果と推察される。

以上、11年半に及ぶ追跡調査の知見を述べてきたが、その結果を総括すると、供用5年経過(累積大型車交通量200万台程度)で大型車の通行が多いと考えられる走行車線で、わだち掘れ量が5.0mmの大幅な増加を示し、透水性舗装の最大の機能である透水能力を表す透水量は供用開始2年後(累積大型車交通量100万台程度)を境に大きく低下する傾向がみられた。しかし、透水係数と相関が高いと考えられる採取コアの空隙率については、供用6ヶ月後および供用4年後(累積大型車交通量20万台および180万台程度)での低下が大きく、透水量との直接的な相関は見られなかった。また、透水性舗装は吸音性が高く騒音低減効果という機能も備えているが、騒音測定

の結果からは、人間が敏感に聞き取る周波数での騒音低減効果は施工直後から12年経過した時点においても1.0~2.0dB程度の低減効果が持続されていることが確認できた。しかし、排水性舗装の一般的な騒音低減効果は、3.0~5.0dB程度であることを考慮すると、供用2年以降では1.0~2.0dB程度となっており、騒音低減に対する性能低下が伺える。

透水性舗装は、雨水等を舗装体内に浸透させることから、下層路盤および路床の支持力低下が懸念されるため、FWDによる支持力調査を実施したが、路床においては施工直後から現在に至るまで同程度の水準を維持しており、雨水浸透の影響は小さいことが確認された。下層路盤の支持力については、切込砕石を使用した2~4工区がAs再生砕石を使用した5~7工区より支持力の低下が著しい結果となったものの、As再生砕石を使用した工区においては、11年半が経過した現在も良好な支持力を維持している状態である。

本研究で行った調査は、1993年6月の車道透水性舗装の試験施工から供用139ヶ月後までの路面性状および透水性舗装としての機能、耐久性とさらに供用性の評価を目的に実施された。この長期にわたる調査において透水性舗装は、路面性状および供用性の評価という観点からみて路床、路盤の支持力が交通量に見合った設計条件であれば優れた耐久性を示すことが確認できた。

参考文献

- 1) 齋藤武雄: ヒートアイランド - 灼熱化する巨大都市, 講談社, pp.56, 1997.
- 2) 土木学会誌: 「風をおこそう!」打ち水大作戦実施される, Vol.89, No.10, pp.104, 2004.
- 3) 姫野賢治: 都市における熱環境と舗装 - ヒートアイランド現象と舗装 -, セメント・コンクリート, No.613, pp.26~34, 1998.
- 4) 日本道路建設業協会編: 透水性舗装ハンドブック, pp.14, 1979.
- 5) 西山 哲, 大西有三, 矢野隆夫, 和田 実: 洪水抑制およびヒートアイランド現象緩和のための透水性舗装, 土と基礎, Vol.53, No.9, pp.24~26, 2005.
- 6) 丹原康滋, 大西有三, 西山 哲, 矢野隆夫, 曾田 知, 小林英彦: 都市における洪水抑制のための地下水の水文学的研究, 第54期材料学会学術講演会講演論文集, pp.131~132, 2005.
- 7) 大西有三, 西山 哲, 矢野隆夫, 青木一男, 曾田 知, 和田 実: 透水性舗装の都市型洪水抑止効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, (投稿中)
- 8) 青木一男, 深谷文統, 大西有三, 西山 哲, 矢野隆夫, 和田 実, 宮崎幸雄: 透水性舗装における Diskin and Nazimov の浸透能式の適応性について, 日本地下水学会 2005 年秋季講演会講演要旨, pp.314~317, 2005.
- 9) 青木一男, 深谷文統, 大西有三, 西山 哲, 矢野隆夫, 和田 実, 宮崎幸雄: 豪雨時における透水性舗装のピークカットに関する実験的研究, 地下水地盤環境に関するシンポジウム 2005 発表論文集, pp.79~86, 2005.
- 10) 丹原康滋, 大西有三, 西山 哲, 矢野隆夫: 透水性舗装における蒸発散と熱移動に関する研究, 第39回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.2363~2364, 2004.
- 11) 青木一男, 長友靖恭, 大西有三, 西山 哲, 矢野隆夫, 曾田 知, 和田 実: 透水性舗装における水移動および熱移動に関する実験的研究, 日本地下水学会 2004 年秋季講演会講演要旨, pp.102~105, 2004.
- 12) 北山迪也, 大西有三, 西山 哲, 上原真一, 矢野隆夫, 青木一男: 透水性舗装における熱と水の移動に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, V-36, 2005.
- 13) 笠原彰彦, 根本信行, 四辻 勝: 車道透水性舗装の表層の耐久性に関する検討, 土木学会年次学術講演会論文集, No.42, pp.118~119, 1987.
- 14) 田口 仁, 帆苅浩三, 佐藤勝久, 田村淳也, 渡辺俊治: 透水性アスファルト安定処理剤の安定性および耐久性の基礎的検討, 土木学会年次学術講演会論文集, No.53, pp.130~131, 1998.
- 15) 日本道路協会編: 舗装試験法便覧, 1989.
- 16) 日本道路協会編: 道路維持修繕要綱, 1978.
- 17) 土木学会舗装工学委員会編: 舗装工学ライブラリー 2 FWD および小型 FWD 運用の手引き, 2002.
- 18) 道路保全技術センター編: FWD 運用マニュアル(案), 1996.
- 19) 日本道路協会編: 舗装試験法便覧別冊(暫定試験方法), 1996.
- 20) 市原 薫, 小野田光之: 路面のすべりとその対策, 技術書院, pp.80, 1997.
- 21) 日本道路協会編: 排水性舗装技術指針(案), 1996.
- 22) 岸 幸雄, 後藤春樹, 鈴木信一郎: 低騒音(排水性)舗装機能回復車の新型洗浄システムとその効果, 舗装, Vol.37, No.5, pp.30~34, 2002.
- 23) 勝 敏行, 斉藤 徹, 佐々木昌平, 鈴木 宏: 高速型排水性舗装機能回復車の開発とその効果の検証, 舗装, Vol.39, No.11, pp.15~19, 2004.
- 24) 松井邦人, 井上武美, 三瓶辰之: 舗装各層の弾性係数を表面たわみから推定する一手法, 土木学会論文集 第420号/V-13, pp.107~114, 1990.
- 25) 日本道路協会編: 舗装設計施工指針, 2001.
- 26) 丸山暉彦, 後藤 徹, 阿部長門, 姫野賢治, 林 正則: アスファルト舗装のFWDたわみに関する研究, 第4回北陸道路会議技術報文集, pp.73~78, 1988.
- 27) 井原 務, 井上武美, 陶山武彦: アスファルト舗装の評価診断・修繕設計支援システムの開発, 道路建設, pp.44~53, 1991.