

# 不同结构类型的全透水沥青路面长期性能分析

封雅宏<sup>1</sup>, 袁博<sup>1</sup>, 许斌<sup>2,3\*</sup>, 白子玉<sup>2,3</sup>, 石鑫<sup>4</sup>

(1. 石家庄市交建高速公路建设管理有限公司, 河北 石家庄 050000; 2. 公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心; 3. 中路高科(北京)公路技术有限公司; 4. 河北交通职业技术学院)

**摘要:**为了分析不同结构类型的全透水沥青路面的长期性能, 该文结合石家庄市市政道路中全透水沥青路面的应用实例, 分析了两种不同类型的全透水沥青路面结构及其混合料配合比进行设计。通过在路面结构中埋设传感器对其进行长期实时监测与数据采集, 得到路面各结构层的温度与湿度数据; 通过对路面相同位置进行渗水试验, 得到不同年份路面的渗水系数。对所采集的数据进行分析, 发现结构 2 相比结构 1, 面层最高温度可降低 3~5 ℃, 最低温度可提高约 3 ℃, 说明其受外界气温影响较小; 降雨后, 两种路面各层位湿度均有明显提高, 但在几天后便能下降到原先的水平, 说明两种结构均能有效排出降雨带来的积水; 结构 2 的底基层与基层的湿度相比结构 1 分别降低了约 47% 和 22%, 说明结构 2 的基层渗水、排水性能优于结构 1; 使用两年后, 两种结构的渗水性能虽略有下降, 但仍远大于技术规范的要求, 满足长期使用的需要。

**关键词:** 全透水路面; 渗水性能; 性能监测; 温度; 湿度

## 1 研究现状

德国于 20 世纪 50 年代首次铺筑透水路面以解决林荫道上树木灌溉问题。20 世纪 60 年代起德国开始铺筑大孔隙透水沥青路面, 并观测其实用性, 最终形成“透水性沥青混合料施工技术指南”。70 年代, 一些欧洲国家在部分轻交通道路上开始使用透水路面。

20 世纪 60 年代, 美国的 The Franklin Institute

Research Laboratories 开始研究透水性路面, 并首先将其应用于停车场。从 70 年代起, 美国开始在各大城市陆续修筑透水路面。2000 年, 美国国家沥青路面技术中心(NCAT)提出了一套透水路面配合比设计方法。在欧洲, 荷兰与丹麦对双层透水性沥青路面进行了一系列研究, 研究出一套双层透水路面结构, 这种结构在保持透水性能良好的同时, 还起到改善路面孔隙堵塞的作用。日本于 20 世纪 80 年代开始推行“雨水渗透计划”。日本的透水路面主要应用于公园、广

\*\*\*\*\*

[7] 张四平, 黄亚飞, 吴曙光, 等. 地震作用下考虑土拱效应的桩间挡板土压力计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018(4).

[8] 梁瑶, 蒋楚生, 李庆海, 等. 桩间复合结构土拱效应试验与受力机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014(增刊 2).

[9] 董捷, 张永兴, 黄治云. 柔性板桩板墙加固斜坡填方地基的土压力分配问题研究[J]. 岩土力学, 2010(8).

[10] 黄治云, 张永兴, 董捷. 桩板墙土拱效应及土压力传递特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013(7).

[11] 赵晓彦, 吴兵, 李登峰, 等. 考虑桩间水平土拱效应的边坡桩间墙组合结构受力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2016(5).

[12] 李长冬. 抗滑桩与滑坡体相互作用机理及其优化研究[D]. 中国地质大学博士学位论文, 2009.

[13] 杨雪强, 吉小明, 张新涛. 抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J]. 中国公路学报, 2014(1).

[14] CHEN T, GUO K X, YANG M, et al. Calculation Method of Anti-Slide Piles Spacing Considering the Soil Arching Effect[C]. Mechanics and Architectural Design: Proceedings of 2016 International Conference, 2017: 461-466.

收稿日期: 2020-06-28(修改稿)

基金项目: 河北省交通运输厅科技项目(编号: XF2018-10)

作者简介: 封雅宏, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: fyh6723@126.com

\* 通信作者: 许斌, 男, 博士, 副研究员. E-mail: xubin819@126.com

场、停车场及城市道路等地。日本应用在城市内的透水性道路结构主要形式为半透水沥青路面,即面层和基层为目标空隙率 20%左右的透水沥青混凝土,下基层采用 3%~6%的密级配沥青混凝土。

透水路面在中国的起步较晚,自 20 世纪 80 年代起开始在地多修筑透水铺装试验路,但在沥青性能、气候等多种因素的影响下,这些试验路并未能取得成功。1996 年,姚祖康等在广东茂名修筑了透水路面试验段;2003 年,何慧斌在保证透水水稳基层的透水性及强度的基础上,通过大量试验确定了干密度、水泥用量及水灰比的取值范围;2005 年,交通运输部公路科学研究院研发出了专用于透水沥青路面的高黏高弹改性剂 HVA 以及生产高黏高弹改性沥青的“干拌工艺”;自 2010 年起,李辉等对全透水路面进行了多方面的研究,如对全透水沥青路面和混凝土路面的实际效果进行对比,通过计算机建模来分析全透水路面的性能,以及开发新的设计方法以进行结构厚度设计等。

近 20 年来,中国一些大中城市开始陆续应用透水路面。广州于 2006 年修建了一段透水铺装试验路,采用综合透水系统,使得部分路面积水可直接渗入地下,其余部分通过透水系统进行收集和排放;2008 年,中国在宁杭高速公路二期工程中修筑了长约 20.7 km 的透水路面试验段。随后,透水沥青路面在江西永武高速公路、安徽宣宁高速公路、四川遂资高速公路、石家庄东三环以及石家庄和平西路等其他省份的项目上也逐渐得到大范围应用。

该文以实际工程应用为基础,对两种不同结构类型的全透水沥青路面进行长期性能观测,以判断其在实际应用中的性能表现。

## 2 路面结构与材料

### 2.1 路面结构

全透水沥青路面的面层主要由大空隙透水沥青混合料组成,路面层结构形式可以分为单层透水沥青面层、双层透水沥青面层。透水沥青路面面层的形式主要受道路等级以及气候、自然环境的影响。若采用单层透水沥青路面的形式,则其厚度设计值可为 40~50 mm。若采用双层或多层的透水沥青路面,则上层的厚度应小于下层的厚度,上层的最大公称粒径也应小于下层的最大公称粒径,如上面层采用 PAC-13 的结构形式,其厚度为 40~50 mm,下面层采用 PAC-20 的结构形式,其厚度为 50~60 mm。

该文所述的全透水沥青路面采用了两种结构形式:结构 1 为 4 cm PAC-13 透水沥青混合料上面层+6 cm PAC-20 透水沥青混合料下面层+18 cm 多孔水泥稳定碎石基层+20 cm 级配碎石底基层;结构 2 为 4 cm PAC-13 透水沥青混合料上面层+6 cm PAC-20 透水沥青混合料下面层+18 cm 多孔水泥混凝土基层+20 cm 多孔水泥稳定碎石底基层。具体结构如图 1 所示。

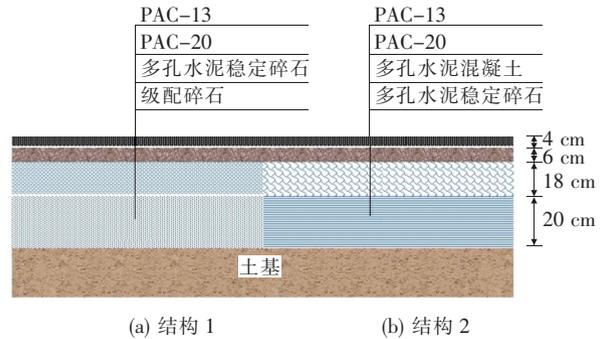


图 1 全透水沥青路面结构图

### 2.2 材料

#### 2.2.1 原材料

(1) 沥青。采用透水沥青专用高黏度改性沥青,其性能指标检测结果见表 1。

表 1 透水沥青路面专用高黏度改性沥青检测结果

指标	单位	检测值	技术要求
软化点	℃	91.5	≥90
延度(5℃, 5 cm/min)	cm	39	≥30
60℃动力黏度	Pa·s	3 014 355	≥200 000
闪点	℃	294	≥230
弹性恢复 25℃	%	99	≥95
离析	℃	2.1	≤2.5
TFOT 质量变化	%	-0.072	≤±0.6
后残留物 延度(5℃)	cm	26	≥20

(2) 粗集料。面层混合料中的粗集料采用玄武岩,基层混合料中的粗集料采用石灰岩,对其技术指标及性能进行检测,结果见表 2、3。

(3) 细集料。采用的细集料其各项指标试验检测结果见表 4。

(4) 矿粉。矿粉的各项检测结果见表 5。

(5) 水泥。采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,对其进行性能检测,其结果见表 6。

表2 石灰岩检测结果

集料粒径/mm	表观相对密度	压碎值/%	吸水率/%	<0.075 mm 颗粒含量/%	针片状颗粒含量/%	软石含量/%	洛杉矶磨耗损失/%	磨光值/BPN	坚固值/%					
3~5	2.736	—	0.62	0.6	—	—	22.4	—	—					
5~10	2.733	—	0.48	0.6	7.2	0.4	16.0	—	1					
10~15	2.734	17.8	0.50	0.6	7.5	0.5	16.0	45	2					
15~20	2.729	—	0.50	0.2	7.3	0.2	16.0	—	2					
20~25	—	2.728	—	0.36	—	2.9	16.0	—	—					
技术要求	≥2.60	≥2.50	≤26	≤2.0	≤3.0	≤1	≤18	≤12	≤15	≤3	≤5	≤28	≥40	≤12

表3 玄武岩检测结果

集料粒径/mm	表观相对密度	吸水率/%	<0.075 mm 颗粒含量/%	软石含量/%	针片状颗粒含量/%	磨光值/BPN	洛杉矶磨耗损失/%	压碎值/%	(高温)压碎值/%	粗集料与沥青的黏附性/级	
5~10	2.870	0.48	0.7	0.4	—	4.7	—	—	—	—	
10~15	2.865	0.37	0.3	—	2.8	—	43	5.8	10.6	5	
技术要求	≥2.80	≤1.0	≤1	≤3.0	≤10	≤12	≥42	≤20	≤18	≤23	≥5

表4 细集料检测结果

项目	表观相对密度	<0.075 mm 颗粒含量(水洗法)/%	砂当量/%	亚甲蓝值/(g·kg <sup>-1</sup> )	棱角性(流动时间)/s
检测值	2.697	9.4	100	1.8	31
技术要求	≥2.5	≤3	≥60	≤2.5	≥30

## 2.2.2 透水沥青混合料

上下面层分别采用 PAC-13 和 PAC-20,其合成级配如表 7 所示,性能检验结果如表 8 所示。其油石比分别为 4.6% 和 4.5%。

## 2.2.3 多孔水泥混凝土

多孔水泥混凝土的级配方案如表 9 所示,其水灰比为 0.40,灰集比为 1:8。

表5 矿粉检测结果

项目	表观密度/(t·m <sup>-3</sup> )	含水量/%	粒度范围/%			外观	亲水系数
			<0.60 mm	<0.15 mm	<0.075 mm		
检测值	2.734	0.2	99.2	89.1	77.8	无团粒结块	0.8
技术要求	≥2.5	≤1	100	90~100	75~100	无团粒结块	<1

表6 42.5 级普通硅酸盐水泥检测结果

细度(80 μm 方孔筛筛余量)/%	初凝时间/h	终凝时间/h	3 d 强度/MPa	
			抗压强度	抗折强度
7.3	2.34	3.30	26.8	5.3

此时,其空隙率为 23.6%,连通空隙率为 19.3%,28 d 弯拉强度和 7 d 抗压强度分别为 1.50 和 8.14 MPa;相应的 28 d 抗弯拉模量和 7 d 抗压弹性模量为

1.43×10<sup>4</sup> MPa 和 2.53×10<sup>4</sup> MPa。

## 2.2.4 多孔水泥稳定碎石

多孔水泥稳定碎石的级配方案如表 10 所示,其水泥含量为 6%。

此时,其渗水系数为 3 614 mL/min,7 d 无侧限抗压强度为 4.37 MPa,最佳含水率为 3.2%,最大干密度为 2.251 g/cm<sup>3</sup>。

## 2.2.5 级配碎石

级配碎石的级配方案如表 11 所示,其含水量为 3.3%。

表 7 合成级配

混合料 类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
	26	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
PAC-13	100	100	93.5	79.1	72.0	22.7	15.5	10.7	8.6	7.0	6.0	5.4
PAC-20	100	97.1	85.7	74.5	56.7	15.4	10.6	7.8	6.1	5.5	4.9	4.3

表 8 PAC-13、PAC-20 透水沥青混合料性能检验结果

试验项目	单位	PAC-13	PAC-20	技术要求	试验方法
理论最大相对密度		2.733	2.722	—	T0711-2011
毛体积相对密度(塑封法)		2.156	2.127	—	T0707-2011
毛体积相对密度(体积法)		2.108	2.067	—	T0708-2011
空隙率(塑封法)	%	21.4	21.8	17~23	T0707-2011
空隙率(体积法)	%	22.8	24.1	18~25	T0708-2011
稳定度	kN	9.2	7.01	≥5.0	T0709-2011
马歇尔残留稳定度	%	91.0	90.0	≥85	T0709-2011
冻融劈裂残留强度比	%	92.5	87.5	≥80	T0729-2011
谢伦堡沥青析漏损失	%	0.06	0.31	≤0.8	T0732-2011
肯塔堡飞散损失	%	10.6	6.3	≤15	T0733-2011
浸水肯塔堡飞散损失	%	14.1	9.5	≤20	T0733-2011
低温弯曲破坏应变	μm	3 321	2 929	≥2 800	T0715-2011
车辙	次/mm	9 546	9 107	≥5 000	T0719-2011
渗水试验	mL/min	5 734	7 878	≥3 600	T0730-2011

表 9 多孔水泥混凝土级配

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
26.5	100	9.5	28
19	78	4.75	5
16	55	2.36	0
13.2	44		

表 10 多孔水泥稳定碎石级配

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
26.5	98.5	2.36	4.5
19	68.5	0.6	2.3
9.5	34.7	0.075	1.4
4.75	6.1		

表 11 级配碎石级配

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
26.5	98.4	2.36	16.2
19	68.8	1.18	10.0
16	61.5	0.6	7.4
13.2	53.8	0.3	5.4
9.5	37.6	0.15	4.4
4.75	20.7	0.075	3.8

### 3 长期性能监测方案

针对实际工程应用进行了长达两年多的性能观测,观测内容为全透水沥青路面的温度、湿度及渗水性能,并通过传感器采集得到了大量的数据。通过对两种全透水路路面结构进行实时监测和数据采集来对这种路面结构的性能进行分析验证。由于数据过多,将同类的所有数据放入一张图中,会产生曲线重合或难以

此时,其最大干密度为  $1.993 \text{ g/cm}^3$ ,  $2.5 \text{ mm}$  CBR 强度值为  $115.8\%$ ,  $5 \text{ mm}$  CBR 强度值为  $114.1\%$ ,浸水试验  $2.5 \text{ mm}$  CBR 强度值为  $28.8\%$ ,  $5 \text{ mm}$  CBR 强度值为  $37.1\%$ 。

分辨不同层位曲线等问题,故截取各时间段的代表性数据进行相应的长期性能分析。

数据采集系统设置在道路中线位置,且各结构传感器位于同一垂线上,每种结构埋设温湿度传感器5个,垂直向土应变计1个。检测系统配置2台主机,1套太阳能供电系统,共计埋设10个温湿度传感器,2个垂直向土应变计。

温湿度传感器埋设采用挖槽法,开槽后将传感器埋入并人工压实,传感器的信号线用大小相当的橡胶管套住,以防止车辆荷载作用下碎石将信号线切断。

垂直向土应变计采用开槽埋设传感器的方法。将土应变计中,带电缆的“⊥”部分,堵头朝上埋入待压实的土体中[图2(a)],并做好标记方便压实后寻找。施工完成后,刨开表层土,拆下堵头取出测杆(注意:测杆不能互换),安装到土应变计上半部中心,下半部装入塑料[图2(b)]保护套管,然后将上半部套入完成安装。安装完成后人工将上下两片之间用土填满夯实。

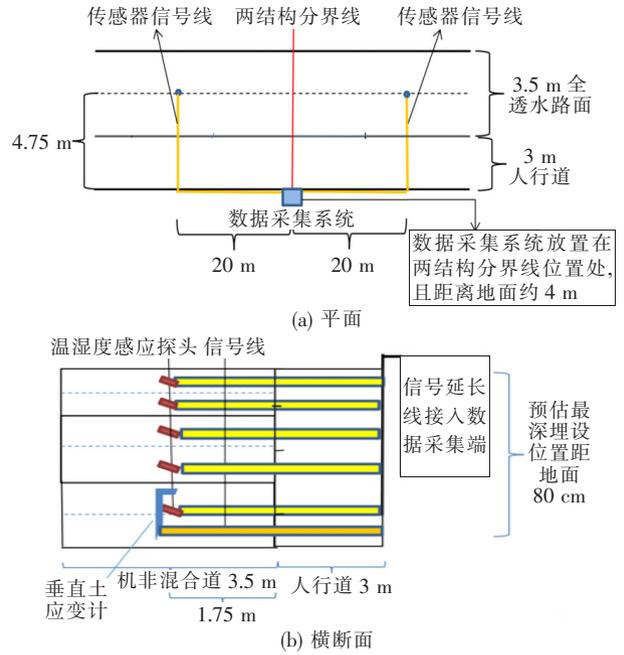


图3 传感器位置图

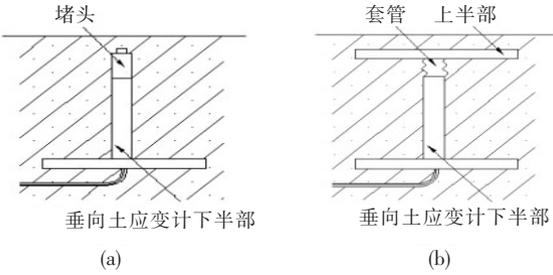


图2 垂直向土应变计埋设过程

传感器位置平面图见图3,温湿度传感器及主要部件见图4。

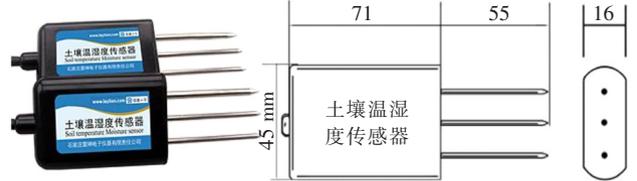


图4 传感器图片(单位:mm)

### 4 长期性能分析

#### 4.1 温度分析

图5、6为全透水沥青路面结构1温度变化曲线图,图7、8为全透水沥青路面结构2温度变化曲线图。

由图5~8可以看出:两种路面结构的土基层温度均保持平稳的变化趋势。而面层和上基层的温度变化较大,且每天中午12:00左右会出现温度峰值。气温较高时,路面上面层温度高于下面层温度,下面层温度又高于基层温度,层间温差最高超过10℃,气温越高,温差越大,且均高于底基层和土基的温度。气温较低时,路面上面层温度低于下面层温度、下面层温度低于基层温度,层间温差为3~5℃,且均低于底基层和土基的温度。以2019年1月份的数据为例:观察图5、7的曲线走势可以看出:结构1的上面层在1月份

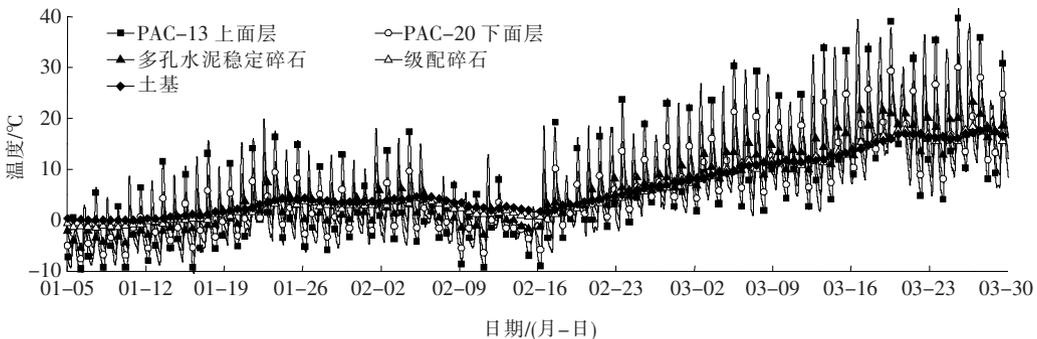


图5 全透水沥青路面结构1温度变化曲线图(2019年1月5日至3月30日)

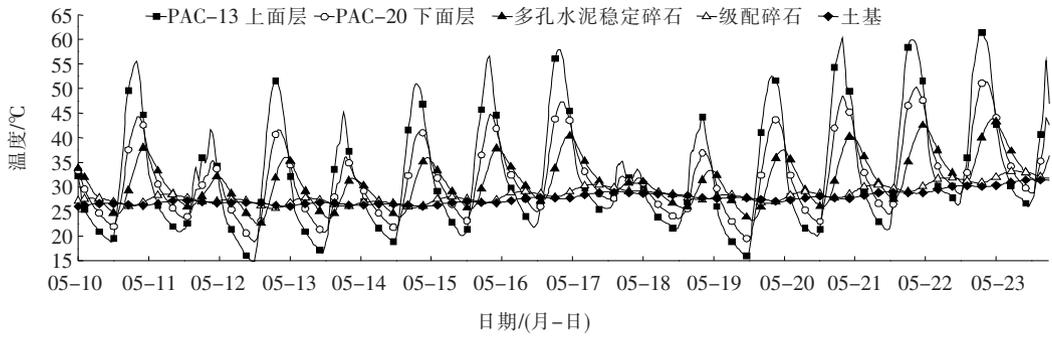


图6 全透水沥青路面结构1温度变化曲线图(2019年5月10日至5月24日)

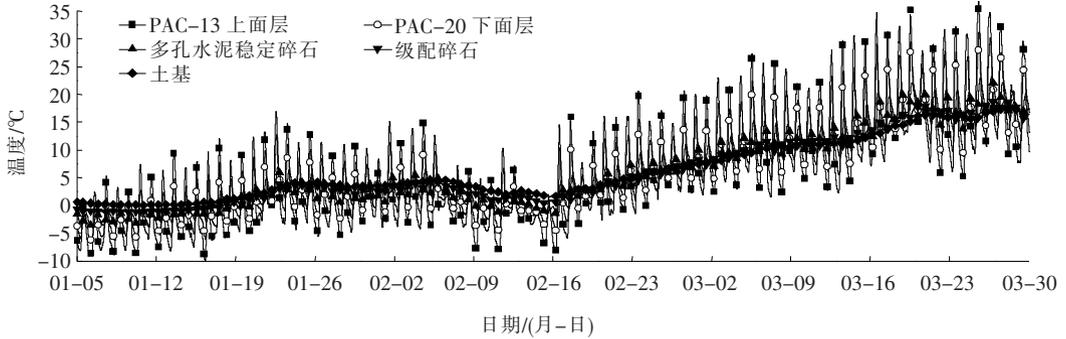


图7 全透水沥青路面结构2温度变化曲线图(2019年1月5日至3月30日)

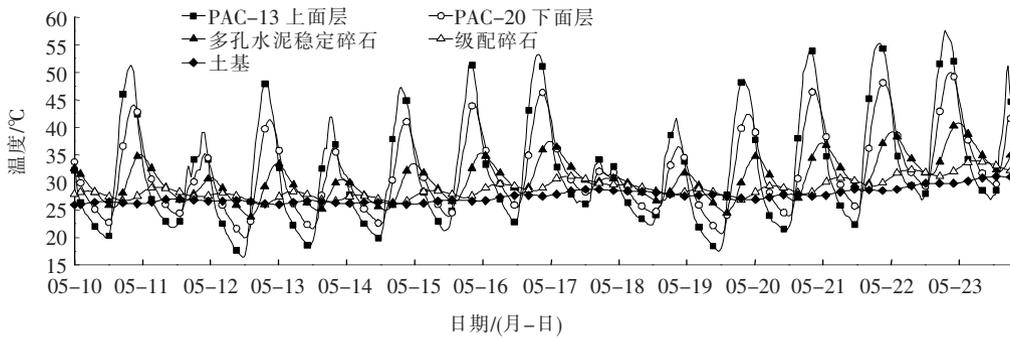


图8 全透水沥青路面结构2温度变化曲线图(2019年5月10日至5月24日)

夜间的最低温度接近 $-10^{\circ}\text{C}$ ,各结构层自上而下温度逐渐变高,土基温度接近 $0^{\circ}\text{C}$ ,而同时段结构2的上面层最低温度为 $-7^{\circ}\text{C}$ 左右,其余规律与结构1相近,说明温度较低时,结构2相比结构1,其各结构层反而能保持更高的温度。

以图9、10的2019年5月10日两种路面结构温度变化为例:两种结构在一天内的温度变化趋势基本相同,但二者的变化幅度略有差异。结构1的日温差幅度达到了 $35^{\circ}\text{C}$ ,而结构2为 $30^{\circ}\text{C}$ 。两种路面结构均在05:00左右达到当日最低温度,此时结构2的各层温度比结构1高约 $1^{\circ}\text{C}$ ;在14:00左右,两种结构达到当日最高温度,此时结构2的上面层温度比结构1

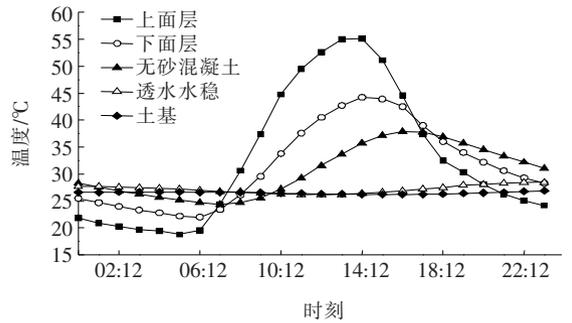


图9 5月10日全透水沥青路面结构1温度变化曲线图(2019年)

低约 $5^{\circ}\text{C}$ ,其他层温度低 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,说明温度较高时,结构2有更好的降温效果。

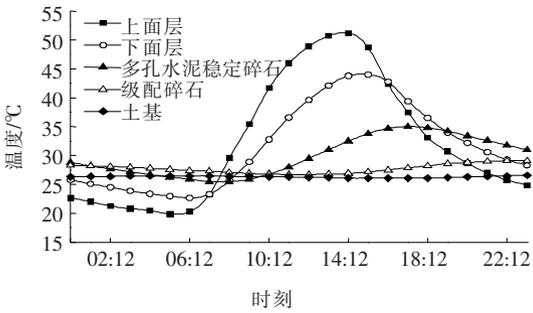


图10 5月10日全透水沥青路面结构2温度变化曲线图(2019年)

结合高温、低温两种天气下的数据分析,可以认为结构2相比结构1,其温度变化幅度较小,说明其受外界气温变化的影响更小。

#### 4.2 湿度分析

图11、12分别为全透水沥青路面结构1、结构2湿度变化曲线图。

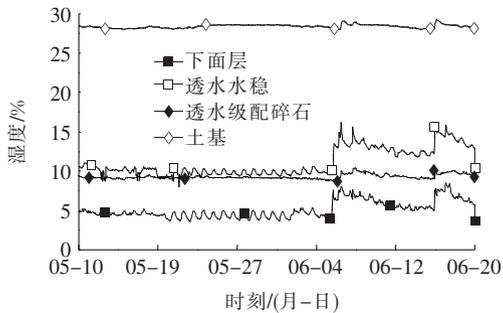


图11 5月10日至6月20日结构1湿度变化曲线图(2019年)

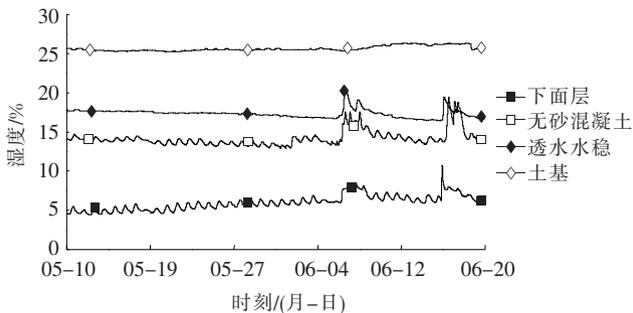


图12 5月10日至6月20日结构2湿度变化曲线图(2019年)

由图11、12可知:结构1中土基、底基层、基层和下面层的湿度分别为26%、17%、13.5%和5.5%左右;结构2中,分别为28%、9%、10.5%和5.5%左右。可以看出:两种结构的面层湿度基本保持一致,而基层和底基层湿度有较大差别,结构2的底基层湿度相比结构1降低了约47%,基层湿度降低了约22%,说明

结构2的基层渗水、排水性能更好。图11、12中各层位的湿度曲线均出现两次突变,且突变时间与幅度相吻合,出现这种状况的原因是当时出现降雨天气。同时可以看出:降雨后面层和基层湿度的变化幅度相近,而土基湿度只略有变化,说明大部分水分在基层就被排出路面结构之外,避免了其对土基可能造成的不利影响;在降雨结束后,路面各层的湿度很快恢复到降雨前的水平,这说明全透水路面各结构层均能有效排出降雨带来的积水。

#### 4.3 渗水性能分析

对全透水路面2018—2019年相同位置处的渗水系数进行了监测,监测数据见表12。

表12 2018—2019年渗水性能监测数据

监测点位	渗水系数/(mL·min <sup>-1</sup> )		
	2018年	2019年	
结构1	传感器东侧4m	7 788.2	7 476.6
	传感器东侧14m	7 535.1	7 432.0
	传感器东侧30m	8 944.8	8 728.8
结构2	传感器西侧10m	9 097.4	8 247.4
	传感器西侧5m	8 642.9	8 000.0

由表12可以看出:全透水沥青路面经过2年的使用,其渗水系数仍远大于技术规范的要求( $\geq 3\ 600$  mL/min),且其渗水系数每年仅下降约5%,可以满足长期使用需要。

## 5 结论

通过对两种全透水路面结构进行实时监测和数据采集,得到路面结构各层位温湿度监测数据,通过分析所收集的数据,得到以下结论:

(1) 所观察的两种全透水沥青路面结构,在道路通车两年后均未观察到路面损坏,结合原材料及混合料的性能检验结果,说明这两种结构都具有良好的路用性能,满足使用要求。

(2) 两种路面结构的土基层温度均保持平稳的变化趋势,而面层和上基层的温度变化较大。气温较高时,路面上面层温度高于下面层温度高于基层温度,层间温差最高超过10℃,气温越高,温差越大,且均高于底基层和土基的温度。气温较低时,路面上面层温度低于下面层温度低于基层温度,层间温差为3~5℃,且均低于底基层和土基的温度。

(3) 气温较高时,结构 2 面层最高温度相比结构 1 低 3~5 °C;气温较低时,结构 2 面层最低温度相比结构 1 高约 3 °C,说明结构 2 受外界气温变化的影响更小。

(4) 结构 2 的底基层湿度相比结构 1 降低了约 47%,基层湿度降低了约 22%,其他层位湿度相近;遇降雨天气,面层和基层的湿度变化幅度相近,而土基湿度只是略有变化,说明大部分水分在基层就被排出路面结构之外,避免了其对土基可能造成的不利影响;在降雨结束后,路面各层的湿度很快恢复到降雨前的水平,说明全透水路面各结构层均能有效排出降雨带来的积水。

(5) 全透水沥青路面的渗水系数每年降低约 5%,使用两年后其渗水系数仍远大于技术规范的要求,说明两种结构的全透水沥青路面的渗水性能均能满足长期使用的需要。

(6) 根据分析结果可知,结构 2 受外界气温变化的影响更小,其基层与底基层排水能力更强,因此选择结构 2 为推荐的工程设计方案,即 4 cm PAC-13+6 cm PAC-20+18 cm 多孔水泥混凝土+20 cm 多孔水泥稳定碎石。

#### 参考文献:

[1] 王德密,姜迪,狄升贯. 透水路面设计与材料应用综述[J]. 城市道桥与防洪,2013(9).

[2] 李鑫. 透水性沥青路面结构设计[D]. 长安大学硕士学位论文,2009.

[3] Metropolitan Service District (Or.). Green Streets: Innovative Solutions for Stormwater and Stream Crossings [M]. Portland, OR: Metro, 2002.

[4] Watson D, Johnson A, Jared D. Georgia Department of Transportation's Progress in Open - Graded Friction Course Development [J]. Transportation Research Record,1998(616):30-33.

[5] Prithvi S. Kandhal, Rajib B. Mallick. Design of New - Generation Open - Graded Friction Course [R]. NCAT Report No. 99-3,1999.

[6] Water Sensitive Urban Design Research Group. Water Sensitive Residential Design: An Investigation into its Purpose and Potential in the Perth Metropolitan Region [M]. Leederville, WA: Western Australian Water Resources Council, 1990: 1-20.

[7] 林正清. 欧洲国家采用透水沥青材料铺路的经验[J]. 国外公路,1992(1).

[8] Goubert, Luc, Hooghwerff, Jan, The, Peter, et al. Two - Layer Porous Asphalt: An International Survey in the Frame of the Noise Innovation Programme (IPG) [C]. 34th International Congress on Noise Control Engineering 2005.

[9] 蒋玮. 透水沥青路面材料和结构的组成设计与功能评价 [D]. 长安大学博士学位论文,2011.

[10] 日本道路协会. 透水性铺装技术指南(案) [M]. 东京: 丸善株式会社,1996.

[11] 日本道路协会. 透水路面 [Z],2007.

[12] 日本道路协会. 铺装施工便览 [Z],2001.

[13] 曹东伟. 排水沥青路面设计与施工技术细则(总校稿) [Z],2017.

[14] 姚祖康,沈惠生,陈诗信,等. 路面结构的内部排水设施 [J]. 公路,1997(5).

[15] 何慧斌. 大孔隙水泥稳定碎石混合料研究及应用 [D]. 湖南大学硕士学位论文,2003.

[16] 曹东伟,刘清泉,唐国奇. 排水沥青路面 [M]. 北京: 人民交通出版社,2010.

[17] Li, H. The Use of Reflective and Permeable Pavements As a Potential Practice for Heat Island Mitigation and Stormwater Management [J]. Environmental Research Letters,2013,8(1).

[18] Li, H., Jones, D., Harvey, J.. Computer Modeling Study to Understand the Performance Properties of Fully Permeable Pavements (Technical Memorandum) [M]. California Department of Transportation, Sacramento, 2010.

[19] Hui Li, David Jones, John Harvey. Development of Mechanistic - Empirical Design Procedure for Fully Permeable Pavement Under Heavy Traffic [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2012;82-94.

[20] 张洪清,宋志斌,杨庆,等. 透水性铺装对城市生态环境改善的分析 [J]. 水科学与工程技术,2005(增刊).

[21] 刘文松. 纤维排水沥青混合料试验评价 [D]. 长安大学硕士学位论文,2011.

[22] 赵丽华,杨志浩,许斌,等. 基于透水性能的全透水沥青路面结构设计 [J]. 中外公路,2019(4).

[23] JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范 [S].

[24] JTG F30-2003 公路水泥混凝土路面施工技术规范 [S].