

# 透水沥青路面的储水-渗透模型与效能

蒋 玮<sup>1</sup>, 沙爱民<sup>1</sup>, 肖晶晶<sup>2</sup>, 裴建中<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 将降雨过程数值化并对雨水入渗的物理过程进行划分; 选定雨水吸附率、渗透速度、空隙率/连通空隙率、结构层厚度等路面材料参数以及降雨重现期和历时等降雨参数, 基于气象学和水力学理论建立透水沥青路面的储水-渗透模型, 提出相应的功能设计目标, 并对透水路面的效能进行计算和分析。结果表明: 所建模型能够针对不同地域的气象和降雨特点对透水路面的储水、渗透功能进行预估和评价; 透水沥青路面最大储水量出现时间滞后于最大降雨强度发生时间; 当透水路面结构不满足该降雨条件下的储水和渗透功能要求时, 可以增大路面储水结构层的厚度, 或者在路面结构中铺设纵向排水管道。

**关键词:** 道路工程; 透水路面; 多孔混合料; 储水; 渗透

**中图分类号:** U414.1

**文献标志码:** A

## Water Storage-infiltration Model for Permeable Asphalt Pavement and Its Efficiency

JIANG Wei<sup>1</sup>, SHA Aimin<sup>1</sup>, XIAO Jingjing<sup>2</sup>, PEI Jianzhong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Rainfall process was numeralized and the physical process of rainwater infiltration was divided into four steps. Pavement materials parameters such as rainwater adsorption rate, permeation rate, air voids content/connected air voids content, pavement thickness and precipitation parameters such as rainstorm return period, rainfall duration were selected for permeable asphalt pavement water storage-infiltration model based on the theory of meteorology and hydraulics, and the target of function design was put forward. Then, the efficiency of water storage and infiltration for permeable asphalt pavement was calculated and analyzed. Results show that the model can predict and evaluate the function of water storage and infiltration for permeable pavement in different regions on different meteorological and

rainfall condition. Maximum water storage occurs in the pavement behind the time the rainfall intensity reaches its peak. The water storage structure layer can be thickened or longitudinal drainage pipe can be employed in the pavement structure if the permeable pavement structure can not meet the demand of water storage or infiltration function for some precipitation condition.

**Key words:** road engineering; permeable pavement; porous mixture; water storage; infiltration

透水沥青路面是指由较大空隙率混合料作为路面结构层、允许路表水进入路基的一种沥青路面结构。相对于目前以密实型路面铺装为主的城市道路, 透水沥青路面能够有效地补充地下水, 缓解城市热岛效应<sup>[1]</sup>; 减小暴雨时的洪峰流量, 减轻城市排水系统压力; 显著降低车辆行驶噪声, 有效改善道路行驶的安全性和舒适性。透水沥青路面显著提高了道路的生态环保效益, 因而在国内外得到了广泛的关注<sup>[2]</sup>。

Dreelin 等<sup>[3]</sup>对黏性土路基的透水路面路表径流量进行研究, 发现较之于密实路面, 透水路面能够降低约 93% 的地表径流, 同时可以过滤地表径流中所含的碳氢化合物、重金属和氮磷污染物。Kuang 等<sup>[4]</sup>对透水路面材料的空隙特征与渗透速度的关系模型进行研究。Alvarez 等<sup>[5-6]</sup>对透水路面的功能和耐久性能之间的平衡进行优化。文献<sup>[7]</sup>通过现场测量对透水路面雨水渗透功能的持续性进行研究。文献<sup>[8]</sup>对透水沥青路面的适用性和耐久性进行研究。关彦斌<sup>[9]</sup>建立了透水沥青混合料有效空隙率与渗透量的数学关系和透水沥青路面结构设计参数体系。丁庆军等<sup>[10]</sup>研究了透水路面材料的空隙率、粒径和厚度等对材料吸声系数的影响规律以及吸声降噪机理。田波等<sup>[11]</sup>建立了贫混凝土透水基层的退水时间、

收稿日期: 2011-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(51208049); 中国博士后科学基金(2012M511964); 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2012CB626814); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1050)

第一作者: 蒋 玮(1983—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为路面结构与材料。E-mail: jiangwei\_029@sina.com

退水百分比、空隙率和坡度之间的回归关系。综上所述,目前针对透水沥青路面的研究主要集中在透水路面材料组成设计、渗透能力、耐久性和雨水净化效果等方面<sup>[12-14]</sup>,而对透水路面储水和透水效能的研究相对较少,本文基于气象学和水力学基本理论建立透水路面的储水-渗透模型并对其效能进行研究。

## 1 透水路面材料与结构

透水沥青路面从结构上可分为面层、基层和垫层,如图1所示。与传统密实的路面结构相比,在结构设计时需要更多地考虑储水、透水功能。

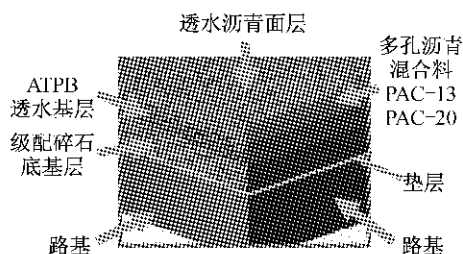


图1 透水沥青路面典型结构

Fig.1 Typical structure of permeable asphalt pavement

透水沥青路面面层一般采用多孔沥青混合料(porous asphalt concrete, PAC),可以铺筑一层或两层。要求使用强度高、耐磨耗的碱性或中性集料,同时多采用高黏度改性沥青作为结合料。

透水路面基层在面层下,一方面参与路面结构的承载,具有力学强度;另一方面在降雨期间可以作为储水层,暂时储存雨水。透水基层材料主要包括开级配沥青稳定碎石(ATPB)、透水性良好的级配碎石(砾)石、多孔混凝土基层、水泥稳定碎石透水基层等。

垫层介于基层与路基之间,一般采用粗砂、砂砾、粒径较小的碎石等透水性好的粒料类材料,或选用聚酯类、尼龙或聚丙烯材料制成的土工织物,主要起隔离路基、防止细粒料堵塞透水层的过滤作用。粒料类的垫层还可以改善路基水温状况,提高路面结构的水稳性和抗冻胀能力。

存储在路面结构中的雨水最终通过路基下渗,因此要求路基具有足够的水稳定性。在路基土材料中,砂性土的水稳定性较好,适宜铺筑透水路面;在黏性土等材料的路基上铺筑透水沥青路面时,宜采用石灰或水泥等无机结合料进行稳定处理,以提高路基的水稳定性和抗冲刷性。透水路面不宜在交通量大的道路中使用。

## 2 降雨与入渗过程

### 2.1 降雨过程的数学模型

建立透水路面储水-渗透模型,首先需要确定降雨过程中各个阶段的降雨强度和降雨量。为此结合我国城市普遍使用的降雨强度公式类型,对降雨过程建立数学模型<sup>[15]</sup>。我国在排水管道设计中,降雨强度公式一般采用

$$i = \frac{167A_1(1 + C \lg P)}{(t + b)^c} \quad (1)$$

式中: $i$ 为降雨强度, $L \cdot (s \cdot hm^2)^{-1}$ ;  $A_1$ 为重现期为1年的设计降雨量,mm;  $C$ 为雨量变动参数,是反映设计降雨各历时不同重现期的强度变化程度的参数之一;  $P$ 为设计降雨重现期,年;  $t$ 为降雨历时,min;  $b, c$ 为常数,共同反映重现期的设计降雨随历时延长其强度递减变化的情况。

如果设计重现期和设计降雨历时已经确定,就可以通过式(1)求得设计降雨强度。由于对某一区域给定重现期下降雨强度公式的分子  $167A_1(1 + C \lg P)$  为常数,设为  $a$ ,可将式(1)简化为

$$i_{avg} = \frac{a}{(t + b)^c} \quad (2)$$

式中: $i_{avg}$ 为平均降雨强度, $mm \cdot min^{-1}$ 。它也可以表示为

$$i_{avg} = \frac{1}{t} \int_0^t i(t) dt \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为降雨强度随时间变化的变量。将式(2)和(3)合并可以得到

$$a(t + b)^{-c} = \int_0^t i(t) dt \quad (4)$$

对上式两边求导可得

$$i(t) = \frac{a[(1 - c)t + b]}{(t + b)^{c+1}} \quad (5)$$

根据式(5),当已知降雨重现期、降雨历时和设计降雨量时,可求得不同时段内的降雨过程分配。上式中采用的降雨强度单位为  $mm \cdot min^{-1}$ ,而我国规范中采用式(1)计算的降雨强度单位为  $L \cdot (s \cdot hm^2)^{-1}$ ,可通过下式进行单位换算:

$$L \cdot (s \cdot hm^2)^{-1} = \frac{6}{1\,000} mm \cdot min^{-1} \quad (6)$$

### 2.2 雨水入渗的物理过程

建立降雨过程的数学模型后,为了得到一个能反映路面实际使用状况的降雨渗透模型,必须了解雨水渗入路面结构的过程。为此,将雨水在透水沥青路面结构中入渗的物理过程,按时间先后顺序划分

为如下四个阶段:

(1)降雨过程初期,路面结构的浸润(阶段1).降雨初始,雨水降落到路面上,在重力和毛细管力的作用下向下流动,流入路面结构内部.随后在分子力的作用下,被路面材料吸附而成为薄膜水<sup>[16]</sup>.此阶段中路面结构自上而下被浸润,雨水不会渗入路基.

(2)路基土的初始渗透(阶段2).随着降雨量不断增加,当路面结构被整体浸润后,雨水开始到达路基顶面.由于路基土具有一定的渗透能力,初始水流会通过路基土下渗,若此时路基土的渗透速度大于降雨强度,则这一过程中也不会在路面结构内产生雨水蓄积.

(3)路面结构中雨水的蓄积(阶段3).在典型的降雨过程中,降雨强度一般会经历一个由低值增大到峰值,再逐渐减弱的过程.在降雨强度逐渐增大的过程中,当路面结构被完全浸润,且降雨强度大于路基土的渗透速度时,渗透到路面结构中的雨水来不及渗入路基土,路面结构中开始蓄积雨水.随着降雨强度的不断增大,蓄积的雨水也逐渐增多,当降雨强度出现峰值后,雨水蓄积量仍继续增大,但增速减缓,直至降雨强度减弱至路基的渗透能力时,路面结构中蓄积的雨水达到最大量.

(4)路面结构中雨水的排出(阶段4).当蓄积在路面结构中的雨水达到最大量后,此时降雨强度已经小于路基的渗透能力,通过路基的渗透不断排出路面结构中的雨水.

在降雨过程中,空气相对湿度较大,且道路所占面积有限,路面结构中水分的蒸发量较小,因此在模型的建立过程中不考虑路面结构中水分的蒸发.

### 3 储水-渗透模型

#### 3.1 模型参数

基于上述分析可知,要计算透水路面储水-渗透能力,从路面材料与结构角度出发需要考虑如下因素:

(1)为了计算路面从干燥状态转变为完全浸润状态能够吸附的雨水量,需要确定路面各结构层材料的雨水吸附率.将该参数定义为在不发生竖向渗透的前提下,路面材料能够在分子力作用下自然吸附的最大量水的体积占路面材料毛体积的百分比.

透水沥青路面材料的雨水吸附率可以按照如下步骤和方法测试(见图2):①将试件置于如图2a所示的工作台上,试件底部可视且无接触和阻挡物.为

防止水从试件侧面流出,试件侧面缠上防水胶条.称取试件干重  $m$ .②采用喷壶向试件顶面缓慢而均匀喷洒水雾,喷洒时间间隔为 30 s.③喷水雾后,注意观察试件底部,当首次出现悬挂的水滴时,停止喷水.此时,称取试件附着水的重量  $m_w$ .多孔路面材料的雨水吸附率

$$\eta = \frac{m_w - m}{D} \quad (7)$$

式中: $D$ 为试件的毛体积.

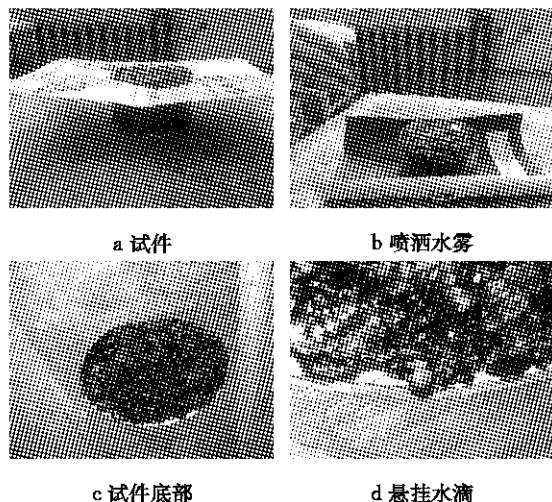


图2 雨水吸附率试验过程

Fig.2 Experiment for ratio of contact with water

(2)路面结构层材料的渗透速度大小直接影响到路面渗水的快慢,路基土材料的渗透速度是影响路面结构中储留雨水时间的主要因素.路基土材料渗透速度的测试方法较多,可以按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)中土的渗透试验方法(T0129—1993/T0130—2007)确定<sup>[17]</sup>.

(3)路面各透水结构层的厚度关系到透水路面储留雨水量的大小.结构层空隙率(连通空隙率)越大、厚度越厚,相应的储水量也越多.透水沥青路面材料的空隙率按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的体积法确定(T0708—2011),连通空隙率可采用称取空气中重和水中重的方法进行计算<sup>[18]</sup>.

(4)除了考虑路面材料和结构等相关参数,还需要确定路面所在地域的降雨条件参数.降雨条件参数主要包括降雨重现期和降雨历时.选取的降雨重现期过短,计算得出的透水路面结构层厚度易使路面在使用期内频繁地不满足透水和排水功能要求;选取的降雨重现期过长,计算得出的路面厚度过大,造成经济成本过高.同样,降雨历时长短的选取也存在这样的矛盾.可以参考《城镇道路路面设计规范》

(CJJ 169—2012),根据道路的等级选择合理的降雨条件参数<sup>[19]</sup>.

### 3.2 模型建立

降雨时,可将透水路面结构视为具有渗透功能的储水空间,一方面雨水不断地流入其中,另一方面通过底部向外渗透排出雨水.按照将路面结构中的连通空隙总体积转换成具有渗透功能的储水空间体积原则(见图3),储水层厚度根据路面各透水结构层厚度和各层材料连通空隙率换算,降雨初期路面结构吸附的少量雨水可以假想成储水空间上部的海绵吸附水层.

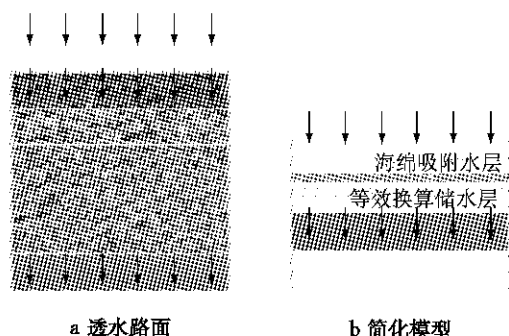


图3 透水路面简化模型

Fig.3 Simplified model of permeable pavement

基于上述简化模型,可将透水结构层厚度换算成等效储水空间厚度.

扣除闭口空隙和雨水吸附率后各透水层材料的有效储水率

$$V'' = V' - \eta \quad (8)$$

式中: $V''$ 为路面材料的有效储水率; $V'$ 为路面材料的连通空隙率.

换算成等效的路面储水空间厚度

$$H' = HV'' = H(V' - \eta) \quad (9)$$

即

$$H'_{\text{surf}} = H_{\text{surf}} V''_{\text{surf}} = H_{\text{surf}} (V'_{\text{surf}} - \eta_{\text{surf}}) \quad (10)$$

$$H'_{\text{base}} = H_{\text{base}} V''_{\text{base}} = H_{\text{base}} (V'_{\text{base}} - \eta_{\text{base}}) \quad (11)$$

$$H' = \sum H'_i \quad (12)$$

式中: $H$ 为路面结构层厚度; $H'$ 为路面储水空间厚度;下标 surf 表示面层,下标 base 表示基层.

由降雨过程的数学模型可以计算给定降雨历时和降雨重现期条件下各时段的降雨强度和累积雨量.在某一时段,若降雨强度小于水在路基土中的渗透速度,路面结构中不会蓄积雨水;若从某一时刻起,降雨强度开始大于水在路基土中的渗透速度,则此后路面结构开始蓄积雨水,可以计算得出各时段路面结构的水位

$$h_j = t \Delta k_j \quad (13)$$

式中: $t$ 为区间段时间长度, $h_j$ 为 $j$ 时段路面结构增加的水位, $\Delta k_j$ 为 $j$ 时段中平均降雨强度与水在路基土中的平均渗透速度之差.

透水路面功能设计的目标为:在降雨期间路面结构中的最高水位小于路面结构层的厚度 $H$ ,即保证在降雨期间路表不会产生积水或出现雨水漫出,同时路面结构内蓄积的雨水能够在降雨结束后较快地排出.

## 4 透水效能评价

根据所建立的透水路面储水-渗透模型和设计目标对实际路面结构的储水和渗透功能进行评价.

### 4.1 模型计算示例

给定路面结构厚度和各层材料设计空隙率,如表1所示.沥青面层采用多孔沥青混合料,分为两层,分别采用PAC-13及PAC-20;上基层采用大空隙沥青稳定碎石ATPB-25,下基层采用公称最大粒径为37.5 mm或31.5 mm的级配碎石;路基材料为砂性土.

表1 路面结构材料和厚度

结构层位	材料名称	厚度/mm	设计空隙率/%
上面层	PAC-13	50	20
下面层	PAC-20	50	20
上基层	ATPB-25	100	20
下基层	级配碎石	300	10
路基	砂性土		

降雨过程计算以北京市为例,选择降雨历时为24 h (1 440 min),降雨重现期为5年,砂性土路基的渗透速度取 $0.000 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,可以计算得到降雨过程中各个时间段内的分段和累积雨量,以及路面结构蓄积的雨水水位,如表2所示.

### 4.2 透水效能分析

根据表2计算所得的各时段降雨强度和路面结构水位数据绘制成图4所示的柱状与曲线图,可以看出在设计降雨重现期为5年、降雨历时为1 440 min的整个降雨过程中,路面结构内的水位随着降雨强度的变化和降雨历时的推移,呈现出先增大后减小的曲线形态.在整个降雨过程中,最大降雨强度发生在720~730 min,即整个降雨过程的中间,最大降雨强度为 $16.259 \text{ mm} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ ,此时路面结构中的水位为221.211 mm;透水沥青路面结构中峰值水位发生的时间在820~830 min,峰值水位为

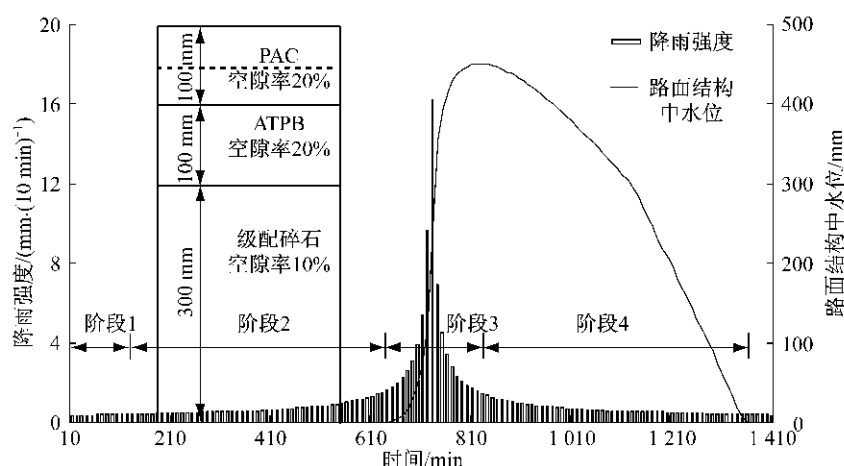


图4 透水沥青路面结构中水位与降雨强度的时间变化

Fig. 4 Variation of water level and rainfall intensity in permeable pavement structure with time

表2 不同时间段的分段、累积雨量和路面结构水位

Tab.2 Subsection, accumulative rainfall and pavement structure water level at different time segments

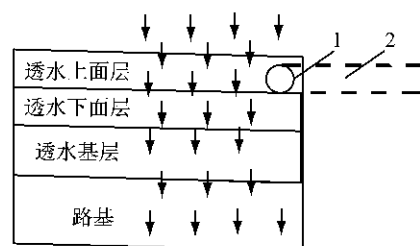
时间/ min	各时段降雨 强度/(mm· (10 min) <sup>-1</sup> )	累积 雨量/ mm	路面结构 实际水 位/mm	路基渗透速 度/(mm· (10 min) <sup>-1</sup> )	渗透 阶段
0	0	0	0	0	
10	0.348	0.348	0.000	1.544	阶段1
20	0.351	0.699	0.000	1.544	阶段1
...	...	...	...	...	...
110	0.387	4.035	0.000	1.544	阶段1
120	0.392	4.427	0.000	1.544	阶段1
130	0.397	4.823	0.000	1.544	阶段2
140	0.401	5.225	0.000	1.544	阶段2
...	...	...	...	...	...
630	1.492	39.236	0.000	1.544	阶段2
640	1.618	40.854	0.000	1.544	阶段2
650	1.773	42.627	0.892	1.544	阶段3
660	1.967	44.594	3.648	1.544	阶段3
...	...	...	...	...	...
720	9.660	71.464	123.258	1.546	阶段3
730	16.259	87.723	221.211	1.548	阶段3
740	6.930	94.654	357.752	1.550	阶段3
...	...	...	...	...	...
830	1.438	116.416	451.540	1.552	阶段3
840	1.341	117.757	450.733	1.552	阶段3
850	1.259	119.016	449.246	1.552	阶段4
860	1.188	120.204	447.178	1.552	阶段4
...	...	...	...	...	...
1340	0.390	149.613	18.718	1.545	阶段4
1350	0.385	149.998	4.774	1.544	阶段4
1360	0.381	150.379	0.000	1.544	—
...	...	...	...	...	...
1440	0.350	153.280	0.000	1.544	—

451.540 mm,较最大降雨强度发生时间滞后了100 min.表明在降雨过程中,透水沥青路面结构中出现最大储水量往往并不发生在最大降雨强度时,而是在最大降雨强度发生后一段时间,具体推迟的时间

同降雨历时及降雨强度相关。

根据上述结果,在整个降雨过程期间,路面结构中的水位峰值(451.540 mm)始终未超出路面结构厚度(500.000 mm),表明该厚度设计下的透水沥青路面能够满足设定区域和给定降雨条件下的透水和排水功能,不会发生由于暴雨在路面结构中来不及排出而导致的路面积水现象。

若计算结果出现路面厚度不满足该降雨条件下的透水能力,计算数据上反映为降雨过程中,存在路面结构中水位线超出路面结构总厚度的状况,则表明:当路面结构在经历该强度和历时的降雨时,路面结构的透水和储水能力不足,路表会出现积水、雨水漫出。此时,可以增大路面储水结构层的厚度(基于造价和结构功能的角度,优先增厚级配碎石基层,其次增大透水基层的厚度)。考虑到道路结构厚度主要是依据交通荷载确定其厚度,若为单纯增大储水功能而增厚路面结构,则不具有经济性。为此,可以在路面面层两侧铺设纵向排水管道,防止雨水溢出,如图5所示。



1—纵向排水管;2—横向排水管

图5 透水路面中纵向排水管道铺设

Fig.5 Longitudinal drainage pipes in the permeable pavement

## 5 结论

(1)对降雨过程数学模型和雨水在透水路面中入渗的物理过程进行计算分析,将雨水在透水沥青路面结构中入渗的物理过程,按时间先后顺序,划分为路面结构的浸润、路基土的初始渗透、路面结构中雨水的蓄积和路面结构中雨水的排出四个阶段。

(2)计算透水路面的储水-渗透能力时,将路面结构中的空隙总体积转换成具有渗透功能的储水空间的体积,储水层厚度依据路面各透水结构层厚度和各层材料有效空隙率换算。

(3)基于气象学和水力学基本理论,选定了路面材料雨水吸附率、渗透速度、空隙率/连通空隙率、路面结构厚度以及降雨重现期和降雨历时等参数,建立了透水沥青路面的储水-渗透模型,可以针对不同地域的气象特点和降雨参数对透水路面的透水、储水功能预估和评价。

(4)透水沥青路面出现最大储水量时间滞后于最大降雨强度发生时间。当透水路面结构不满足该降雨条件下的透水能力要求时,增大路面储水结构层的厚度,或者在路面结构中铺设纵向排水管道。

## 参考文献:

- [1] Pratt C J. Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(5): 145.
- [2] Brattebo B O, Booth D B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems[J]. Water Research, 2003, 37(18): 4369.
- [3] Dreelin E A, Fowler L, Carroll C R. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events[J]. Water Research, 2006, 40(4): 799.
- [4] Kuang X, Sansalone J, Ying G, et al. Pore-structure models of hydraulic conductivity for permeable pavement[J]. Journal of Hydrology, 2011, 399(3): 148.
- [5] Alvarez A E, Martin A E, Estakhri C. A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(3): 1159.
- [6] Alvarez A E, Martin A E, Estakhri C. Internal structure of compacted permeable friction course mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 1027.
- [7] 西山哲,大西有三,矢野隆夫. 透水性舗装の雨水浸透機能に関する研究[C]//土木学会舗装工学論文集. 東京: 社団法人土木学会, 2007, 12: 99-106.
- [8] 吉中保,根本信行,幸田正裕. 透水性アスファルト舗装の車道への適用に関する検討[C]//土木学会舗装工学論文集. 東京: 社団法人土木学会, 2000, 5: 47-52.
- [9] 关彦斌. 大孔隙沥青路面的透水机理及结构设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.  
GUAN Yanbin. Study on infiltration mechanism and structure design of porous asphalt pavement[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [10] 丁庆军,沈凡,刘新权,等. 透水型沥青路面材料的降噪性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 24.  
DING Qingjun, SHEN Fan, LIU Xinquan, et al. Noise-damping performance of draining asphalt pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 24.
- [11] 田波,牛开民,谭华,等. 贫混凝土透水基层的排水能力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 31.  
TIAN Bo, NIU Kaimin, TAN Hua, et al. Discharge ability of lean cement subdrainage Base[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(4): 31.
- [12] 王恩东,张洪亮,王选仓. MAC改性沥青大粒径透水性沥青混合料试验研究[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(6): 6.  
WANG Endong, ZHANG Hongliang, WANG Xuancang. Experimental research of MAC modified large stone porous asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 6.
- [13] 严军,叶奋,王小生,等. 排水面层沥青混合料组成设计的研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(3): 300.  
YAN Jun, YE Fen, WANG Xiaosheng, et al. Research on design of porous asphalt mixture[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(3): 300.
- [14] Scholz M, Grabowiecki P. Review of permeable pavement systems[J]. Building and Environment, 2007, 42(11): 3830.
- [15] 张大伟,赵冬泉,陈吉宁,等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水, 2008, 34(suppl. 2): 354.  
ZHANG Dawei, ZHAO Dongquan, CHEN Jining, et al. Application of Chicago rainfall hydrograph on the simulation for drainage model[J]. Water Supply and Drainage, 2008, 34(suppl. 2): 354.
- [16] 诸永宁. 排水性沥青路面排水性能研究与排水设施的设计[D]. 南京: 东南大学, 2004.  
CHU Yongning. Research on drainage performance and design of drainage structure on the porous asphalt pavement[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [17] 交通运输部公路科学研究院. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Research Institute of Highway of the Ministry of Transport. JTG E40—2007 Technical specification for road soil test[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [18] 交通运输部公路科学研究院. JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Research Institute of Highway of the Ministry of Transport of P R China. JTG E20—2011 Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ 169—2012 城镇道路路面设计规范[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of P R China. CJJ 169—2012 Code for pavement design of urban road[S]. Beijing: China Architecture & Buiding Press, 2012.