

DOI:10.16356/j.1005-2615.2017.04.017

## 排水性沥青路面的排水性能研究

陈 锋 季天剑 解建光

(南京航空航天大学土木工程系,南京,210016)

**摘要:**为提高排水性沥青路面的设计可靠性,采用三维渗流有限元分析方法,并依据短时临近降雨强度等级划分标准对路面的排水性能进行计算和评价。研究表明:增加路面横坡坡度、排水层厚度以及排水层材料的渗透系数均能够有效提高排水性沥青路面的排水能力,路面宽度对排水路面的排水能力影响也十分显著。通过计算确定了路面在一定的降雨强度条件下不出现地表径流的条件,可用于指导排水路面排水层厚度、横坡坡度的选择以及排水性沥青混合料目标空隙率的确定。

**关键词:**排水性沥青路面;排水性能;三维渗流有限元分析;渗透系数;降雨强度

**中图分类号:** TN958      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2017)04-0568-06

## Drainage Performance of Porous Asphalt Pavement

CHEN Feng, JI Tianjian, XIE Jianguang

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** In order to improve the design reliability of the porous asphalt pavement, a 3-D finite element seepage analysis method is used to evaluate the drainage capacity of the porous asphalt pavement, based on gradation criteria of short-term rainfall intensity. The results indicate that the drainage capacity of porous asphalt course (PAC) is improved effectively with the increase of the gradient of cross slopes, the thickness of the course and the permeability coefficient of porous asphalt mixture. Moreover, the width of the porous asphalt layer also has a significant impact on the drainage capacity of PAC. The condition of no runoff of the porous surface layer under certain rainfall intensity can be confirmed by the results, which can guide the choice of the thickness and width of the porous asphalt layer and the determination of the aim void of the porous asphalt mixture.

**Key words:** porous asphalt pavement; drainage performance; 3-D finite element seepage analysis; permeability coefficient; rainfall intensity

传统沥青路面在强降雨情况下会形成路表水膜,容易发生水漂或水滑,影响道路行车安全<sup>[1]</sup>。排水性沥青路面表层混合料具有空隙率大的特点,降雨能快速渗入路表结构、横向排向路面边缘的排水设施中,可为雨水下渗及排出提供通道;此外,能由连通孔隙缓解轮下高水压和轮后负压,因而可提供良好的排水性能和行车安全性<sup>[2]</sup>。

排水性沥青路面的排水性能主要取决于路面的几何设计和排水性沥青混合料的透水性能,其中几何设计主要包括路面厚度、坡度以及排水路径的长度等。排水性沥青混合料的透水性能用渗透系数来表征,渗透系数的大小与材料的空隙率密切相关<sup>[3]</sup>。因此,排水性沥青路面在设计时应该综合考虑各种因素,以实现最佳的排水效果。目前国内外

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2015BAL0B00)资助项目;江苏省科技计划(BE2015349)资助项目。

**收稿日期:** 2016-05-11; **修订日期:** 2016-11-12

**通信作者:** 季天剑,男,副教授,硕士生导师, E-mail: jitianjian@nuaa.edu.cn。

**引用格式:** 陈锋,季天剑,解建光. 排水性沥青路面的排水性能研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 568-573.  
CHEN Feng, JI Tianjian, XIE Jianguang. Drainage performance of porous asphalt pavement[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 568-573.

关于排水性沥青路面排水性能的研究相对较少。Ranieri, Tan 等<sup>[4-5]</sup>对排水路面的渗流过程进行了分析,最早提出了 PAC 路面的排水模型。Eck 等<sup>[6]</sup>通过现场实测水位曲线及数值模拟的方式分析了排水路面的水力学特性,但并未研究各相关参数相互之间的关系。诸永宁等<sup>[7-8]</sup>根据一元渐变流理论和 Darcy 定律建立了排水面层渗流运动模型,并利用 Runge-Kutta 公式求出了排水层最大潜水厚度的数值解。目前大多数学者<sup>[9-10]</sup>对排水路面排水性能的研究都是基于一维渗流理论,并对边界条件加以修正和优化,而实际上雨水在排水性沥青路面结构层内部的渗流属于三维渗流过程,采用一元渐变流原理推导出的渗流运动模型并不能真实反映降雨在排水层内部的渗流过程。张璠<sup>[11]</sup>使用三维渗流软件对水流在排水性沥青路面中的渗流情况进行了模拟,并与按照一元渐变流理论推导的理论公式的计算渗流流量和室内实验值进行了比较,结果发现理论模型的渗流流量结果远小于实测值和数值模拟计算结果,这是因为理论模型的假设条件与实际情况并不完全吻合,采用理论模型进行分析计算需要优化条件,建立更合理的理论分析模型;而室内实测结果与有限元数值模拟结果较为接近,使用三维渗流软件分析计算路面的渗流情况时可以自行定义有限元模型的边界条件,使得有限元渗流模拟过程与实际渗流情况更加接近。

基于以上考虑,本文利用三维有限元渗流分析软件模拟了降雨在排水性沥青路面面层结构内部的渗流,计算出了不同条件下排水性沥青路面的临界降雨强度,分析了排水层坡度、厚度、排水长度以及面层材料渗透系数对路面排水能力的影响,并利用短时临近降雨强度评价各条件下的排水能力,确定了排水面层在一定降雨强度下不出现地表径流的条件,为排水性沥青路面的结构设计以及材料设计起到了指导作用。

## 1 计算参数及计算模型的确定

### 1.1 面层材料的渗透系数

渗透系数是衡量材料透水性能的一个重要参数,也是评价排水性沥青路面透水能力的关键性指标。渗透系数可通过室内试验测得,吴宁等<sup>[12]</sup>利用自行研发的排水性沥青混合料常水头渗透系数测试装置,对排水面层材料的渗透性能进行了研究,试验结果表明,随着孔隙率的变化,排水性沥青混合料的渗透系数维持在 0.1~0.2 cm/s。张璠等<sup>[13]</sup>基于该测试方法研究了排水性沥青混合料横向与竖向渗透系数之间的关系,发现相同级配组成的排水性沥青混合料的横向和竖向渗透系数最大

相对差不超过 20%,二者具有较好的一致性。

本文在研究渗透系数对排水性沥青路面排水能力的影响时,路面横向渗透系数取值分别为 0.08, 0.12, 0.16, 0.20 cm/s。基于张璠等<sup>[13]</sup>的研究,竖向渗透系数与横向渗透系数取值相同。

### 1.2 路面的几何参数与渗流计算模型

排水性沥青路面在中国应用了近 10 年,但目前仍没有排水性沥青路面的相关规范,排水性沥青路面的设计主要是依据工程经验或者借鉴国外经验。国内排水性沥青路面排水表层的厚度一般为 4~5 cm,其下为不透水层。对于路面横坡坡度,公路路线设计规范(JTG/D20—2006)给出的推荐值为 2%,强降雨地区可适当增大<sup>[14]</sup>。为了便于研究,本文的路面纵坡坡度均取为 0。

排水性沥青路面的排水长度越大,路面排水难度就越大。当排水性沥青路面的宽度较大时,如双向六车道、双向八车道路面,通常采用双坡面边缘排水方式,路表降雨排向路面两侧的边沟,排水长度为半副路面的宽度。本文以单坡面边缘排水方式为计算模型分析排水性沥青路面的排水能力,如图 1 所示。排水路径的长度取值为 3.75, 7.5 m。

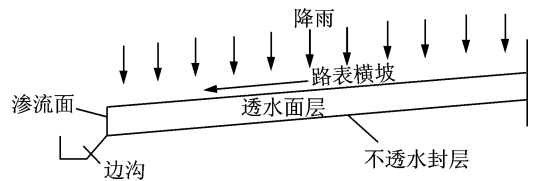


图 1 排水性沥青路面的排水计算模型

Fig. 1 Drainage model of porous asphalt pavement

表 1 为三维渗流有限元模拟路面设计参数及其计算值,并以此研究排水性沥青路面的排水能力。

表 1 排水性沥青路面参数计算值

Tab. 1 Values of calculating parameters of porous asphalt pavement

路面设计参数	计算值
渗透系数 $K/(cm \cdot s^{-1})$	0.08, 0.12, 0.16, 0.20
厚度 $h/cm$	4, 5, 6
宽度 $L/m$	3.75, 7.5
横坡坡度 $i/\%$	0, 1, 2, 3, 4

## 2 有限元模型

三维渗流计算模型中的路面宽度、厚度以及横坡坡度根据表 1 的情况取值,基于有限元的计算精度以及求解速率两方面因素考虑,路面模型长度统一取 40 m,有限元模型如图 2 所示。

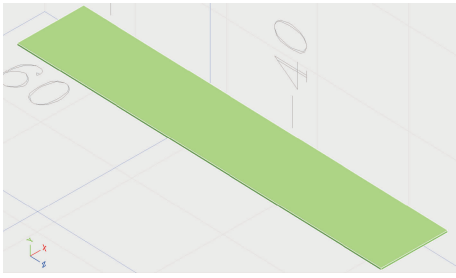


图2 排水性沥青路面的三维有限元模型

Fig. 2 3-D finite element model of porous asphalt pavement

### 3 网格划分及边界条件

#### 3.1 有限元模型的网格划分

计算中采用六面体单元网格,为了保证计算精度,网格的形状划分接近于正六面体。网格划分的数量会影响计算精度,但如果划分的太细,求解时就会耗费大量的时间。由于本文的工况较多,基于以上考虑,整个模型共划分出节点数 25 443 个,单元数为 16 384 个,模型网格划分的局部效果见图 3。

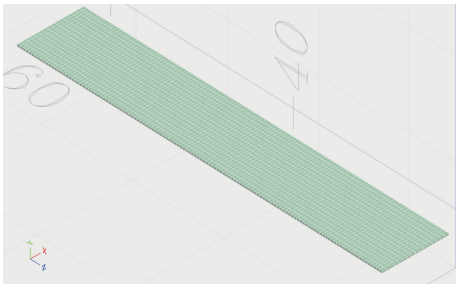


图3 模型的网格划分效果

Fig. 3 Meshing effect of 3-D finite element model

#### 3.2 有限元模型的边界条件

根据渗透模型可知,降雨通过路表渗入到排水性沥青路面的面层内部,面层底部为不透水封层,入渗到面层内部的降雨只能在横坡作用下由路面边缘的渗流面排入边沟。在进行三维渗流有限元分析时给定以下 3 个边界:(1)表层流量边界条件,降雨通过表层入渗到面层内部,在有限元模型上表面给定一个流量值,用来模拟路面降雨;(2)边缘渗流面边界条件,将靠近边沟的边缘面定义为唯一渗流面,作为雨水排水路面结构的唯一途径;(3)不透水面边界条件,模型中除了表层和边缘渗流面,其他面均不透水。

## 4 极限降雨强度的计算

#### 4.1 渗流过程分析

对于排水性沥青路面,透入水的入渗速率主要

取决于排水层的渗透系数;排出速率则由排水性沥青路面的出水能力决定。降雨强度较小时,路面的渗入水能够通过排水层内部的空隙结构排到路面两侧的边沟,不会产生路表径流;但是当降雨强度较大时,排水层的排水速率小于降雨的入渗速率,降雨来不及渗入排水表层,部分降雨就会通过路表综合坡度排出路面,使路表出现径流,影响行车安全。而排水路面的设计原则是要确保雨水能及时渗入路面内排到边沟,保证路表无水膜出现。

#### 4.2 临界降雨强度 $Q_l$ 的有限元计算方法

排水性沥青路面的排水能力与路面材料的渗透系数以及路面的几何参数相关,路面的临界降雨强度  $Q_l$  无法直接由计算求得。在路表面上施加一个降雨强度,路面内部就会出现唯一一个与之对应的浸润面,路面上施加的降雨强度大小不同,浸润面的空间分布也不相同。但总体上会出现以下 3 种情况:

(1)路面降雨强度  $i < Q_l$ , 浸润面位于排水路面结构内部,路表无径流。

(2)路面降雨强度  $i = Q_l$ , 浸润面刚好与排水路面的路表面相切,处于临界状态,路表恰无径流。

(3)路面降雨强度  $i > Q_l$ , 浸润面与排水路面的路表面相交,降雨无法完全从路面结构内部排除,部分降水以路表径流的形式排向边沟,形成水膜。

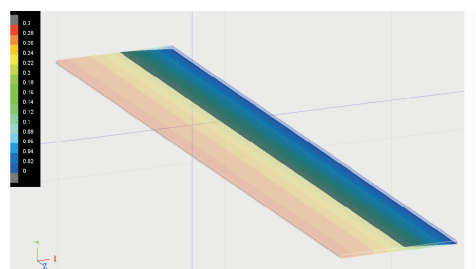
临界降雨强度是利用试算的方法得到,通过不断调整路面模型表面层边界条件中的流量值(降雨强度大小),得出不同的总水头云图。当云图中的浸润面与路表相切时,路表降雨强度达到临界点,无路表径流出现,此时给定在排水层表面的流量值即为排水性沥青路面所能应对的临界降雨强度。

#### 4.3 计算结果及分析

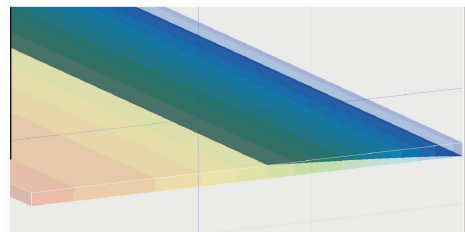
##### 4.3.1 计算结果

根据渗流计算结果,本文给出了一种情况(排水层厚度  $h = 6$  cm,排水长度  $L = 3.75$  m,路面横坡坡度为  $i = 0\%$ ,面层渗透系数  $K = 0.20$  cm/s,降雨强度为  $1 \times 10^{-6}$  m/s)的总水头云图,见图 4,从水头云图中可以看出浸润面的分布情况。本文对表 1 中所列的全部情况进行了计算,由于篇幅所限,此处仅列出部分计算结果,具体见图 5~7。

根据图 5~7 的计算结果可知,路面所能应对的临界降雨强度随着横坡坡度的增大而增大,但增长趋势逐渐变缓,尤其当面层的渗透系数较小时;而面层的渗透系数对临界降雨强度的影响相对单一,两者有着良好的线性关系;排水路面宽度对排水性能的影响则更为显著,由图 5 可知,当  $h = 6$  cm,排水长度  $L$  从 3.75 m 增加到 7.5 m 时,临



(a) Phreatic surface and total head nephogram



(b) Partial enlarged detail of the total head nephogram (shaded areas are phreatic surface)

图 4 浸润面、总水头云图及其局部放大图

Fig. 4 Phreatic surface, total head nephogram and its partial enlarged detail

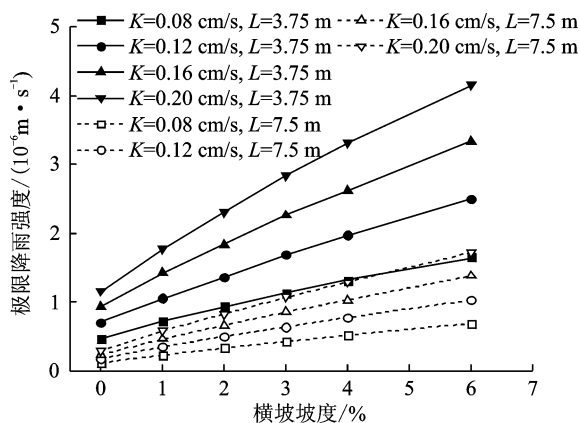


图 5 排水层厚 6 cm、宽 3.75 m 和 7.5 m 的计算结果  
Fig. 5 Calculation results in conditions of thickness 6 cm, width 3.75 m and 7.5 m

界降雨强度降低至原来的 20%~50%。并且  $L=3.75\text{ m}$ ,  $K=0.08\text{ cm/s}$  与  $L=7.5\text{ m}$ ,  $K=0.20\text{ cm/s}$

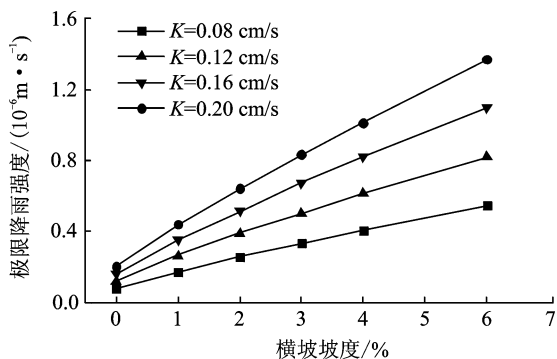


图 6 排水层厚 5 cm、宽 7.5 m 的计算结果

Fig. 6 Calculation results in conditions of thickness 5 cm and width 7.5 m

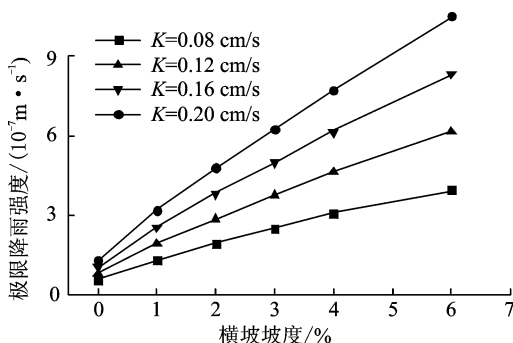


图 7 排水层厚 4 cm、宽 7.5 m 的计算结果

Fig. 7 Calculation results in conditions of thickness 4 cm and width 7.5 m

两种情况的临界降雨强度基本相同,而要使排水层的渗透系数达到 0.20 cm/s,排水性沥青混合料的目标空隙率要控制在 20%以上,由此可知,当排水长度较大时,若仅提高沥青混合料的空隙率,排水性沥青路面无法实现良好的排水性能;此外,增加排水层的厚度也能有效地提高排水性沥青路面的排水能力。表 2 为宽 7.5 m 路面排水能力的计算结果,当横坡坡度为 2%和 3%时,排水层的厚度由 4 cm 增加到 5 cm,排水性能提高 30%左右,当厚度增加到 6 cm 时,排水性能则大幅提高了 70%。

表 2 排水层宽 7.5 m 路面排水能力的计算结果

Tab. 2 Calculation results of drainage performance in condition of width 7.5 m

厚度 $h/\text{cm}$	横坡 $i/\%$	临界降雨强度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$				
		$K=0.08\text{ cm/s}$	$K=0.12\text{ cm/s}$	$K=0.16\text{ cm/s}$	$K=0.20\text{ cm/s}$	$K=0.24\text{ cm/s}$
4	2	$1.91 \times 10^{-7}$	$2.86 \times 10^{-7}$	$3.80 \times 10^{-7}$	$4.78 \times 10^{-7}$	$5.76 \times 10^{-7}$
	3	$2.49 \times 10^{-7}$	$3.74 \times 10^{-7}$	$4.99 \times 10^{-7}$	$6.24 \times 10^{-7}$	$7.49 \times 10^{-7}$
5	2	$2.58 \times 10^{-7}$	$3.88 \times 10^{-7}$	$5.17 \times 10^{-7}$	$6.46 \times 10^{-7}$	$7.75 \times 10^{-7}$
	3	$3.35 \times 10^{-7}$	$5.02 \times 10^{-7}$	$6.71 \times 10^{-7}$	$8.37 \times 10^{-7}$	$1.01 \times 10^{-6}$
6	2	$3.32 \times 10^{-7}$	$4.98 \times 10^{-7}$	$6.62 \times 10^{-7}$	$8.26 \times 10^{-7}$	$9.94 \times 10^{-7}$
	3	$4.28 \times 10^{-7}$	$6.42 \times 10^{-7}$	$8.57 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-6}$	$1.28 \times 10^{-6}$

### 4.3.2 排水能力分析

对于雨量的衡量一般采用降雨强度与降雨历时。降雨强度是指单位时间内的降雨量;降雨历时则是开始降雨到降雨结束所经历的时间。根据经

验,一般强降雨最有可能使排水性沥青路面出现径流,而强降雨通常具有短时性,本文采用短期临近降雨强度标准评价排水性沥青路面的排水能力,见表3。

表3 短时临近降雨强度等级划分标准

Tab. 3 Gradation criteria of short-term rainfall intensity

降雨强度等级	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
1 h 降雨总量/mm	0~1.5	1.6~3.5	3.6~7.9	8.0~19.9	20~49.9	50
折算强度/( $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	<0.43	0.44~0.97	0.98~2.22	2.23~5.56	5.57~13.9	$\geq 1.39$

由表3中短时临近降雨强度等级划分标准以及有限元计算结果可知,在路面宽度为3.75 m的情况下,排水层渗透系数大于0.12 cm/s,路面横坡大于1%时均能保证在中雨的情况下无水膜出现。在面层厚度为5~6 cm、横坡坡度取到3%~5%,面层材料的空隙率较大时,甚至能应对大雨甚至暴雨。路面的排水长度增大时,其排水能力会极大地减弱,尤其对于单向四车道路面,其半副路面排水长度已经达到7.5 m,但是参照本文的计算结果,通过合理的设计依然能使其应对中雨或大雨天气。

由上文的计算结果及分析可知,增加排水层的厚度、缩短路面宽度、增大路面横坡坡度以及提高排水层沥青混合料的渗透系数都能够有效地提升排水性沥青路面的排水能力。因此,为实现排水性沥青路面较好的排水性能,在进行道路设计时应从以下几方面对路面结构及面层材料进行优化设计:例如,双向六车道及八车道路,由于车道宽度较大,采用双坡面排水方式能够有效地缩短排水长度;对于暴雨量大的地区,可考虑采用较大的横坡坡度(3%~4%)或增加排水层的厚度(5~6 cm),规范推荐的排水横坡为2%左右,排水层厚度为4~5 cm。另外,增大排水层沥青混合料的空隙率也可明显地提高路面的排水能力,排水性沥青混合料的空隙率通常在15%~25%,空隙率越大沥青混合料的渗透系数越大。但是当排水沥青路面空隙率增大后,在动水压力作用下,冲刷作用会更严重,更容易引起沥青与集料发生剥落,出现水损害。因此,基于耐久性方面的考虑,不能够一味地提高排水沥青混合料的空隙率。

## 5 结 论

(1)利用三维渗流有限元模拟了降雨在排水性沥青路面排水层内的渗流过程,并通过试算法计算出了各种情况下排水性沥青路面的临界降雨强度。

(2)排水性沥青路面的临界降雨强度随着横坡坡度的增大而增大,但增长趋势逐渐变缓,尤其当

面层的渗透系数较小时;面层的渗透系数对临界降雨强度的影响相对单一,两者呈现较好的线性关系;排水长度对排水性能的影响则更为显著,当 $h=6 \text{ cm}$ ,排水路面宽度 $L$ 从3.75 m增加到7.5 m时,临界降雨强度降低至原来的20%~50%;增加排水层的厚度可以大幅提高路面的排水性能。排水路面宽度为7.5 m,横坡坡度为2%和3%时,排水层的厚度由4 cm增加到5 cm,排水性能提高30%左右,当厚度增加到6 cm时,排水性能则大幅提高了70%。

(3)使用短时临近降雨强度标准分析排水沥青路面的排水性能,并确定了排水面层在一定降雨强度下不出现地表径流的条件,可用于指导排水路面排水层厚度、横坡坡度的选择以及排水性沥青混合料目标空隙率的确定,并作为各参数间的协调性选择依据。

### 参考文献:

- [1] 季天剑,黄晓明,刘清泉.部分滑水对路面附着系数的影响[J].交通运输工程学报,2003,3(4):10-12.  
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 10-12.
- [2] 张璠,杨军,卞凤兰.排水性沥青路面的排水功能设计与实践[J].中外公路,2009,186(6):101-103.  
ZHANG Fan, YANG Jun, BIAN Fenglan. Drainage function design and practice of porous asphalt pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 186(6): 101-103.
- [3] RANIERI V, YING Gaoxiang, SANSALONE J, et al. Drainage modeling of roadway systems with porous friction courses [J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(4): 395-405.
- [4] RANIERI V. Runoff control in porous pavements [J]. Transportation Research Record, 2002, 1789(1): 46-55.
- [5] TAN S, FWA T, CHAI K. Drainage considerations for porous asphalt surface course design [J]. Trans-

- portation Research Record, 2004, 1868(1):142-149.
- [6] ECK B J, BARRETT M E, CHARBENEAU R J. Drainage hydraulics of porous pavement overlays [C]//Proceedings of 2011 World Environmental and Water Resource Congress. Palm Spring, California, USA:[s. n.], 2011:1525-1534.
- [7] 诸永宁,陈荣生,倪富健.排水性沥青路面排水性能评定方法研究[J].公路交通科技,2004,21(8):9-11,16. ZHU Yongning, CHEN Rongsheng, NI Fujian. Research on evaluation method of drainage performance of the porous asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(8):9-11, 16.
- [8] 马翔,倪富健,李强.排水面层渗流模型及参数[J].东南大学学报:自然科学版,2014,44(2):381-385. MA Xiang, NI Fujian, LI Qiang. Seepage model and porous pavement layer[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(2):381-385.
- [9] SANSALONE J, KUANG X, RANIERI V. Permeable pavement as a hydraulic and filtration interface for urban drainage [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2008, 134(5):666-674.
- [10] ONG G, FWA T. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance; Modeling [J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(10):590-598.
- [11] 张璠.排水性沥青路面的排水能力设计计算研究[D].南京:东南大学,2014. ZHANG Fan. Research on design and calculation for drainage performance of porous asphalt pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.
- [12] 吴宁,张璠.排水性沥青混合料竖向渗透系数试验方法改进研究[J].公路,2010(5):72-76. WU Ning, ZHANG Fan. Research on test method improvement of hydraulic conductivity of porous asphalt mixture [J]. Highway, 2010(5):72-76.
- [13] 张璠,陈荣生,倪富健.排水性沥青路面混合料的渗透性能试验测试技术[J].东南大学学报:自然科学版,2010,40(6):1288-1292. ZHANG Fan, CHEN Rongsheng, NI Fujian. Techniques of permeability testing for porous pavement mixture [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2010, 40(6):1288-1292.
- [14] 中交第二公路勘察设计研究院. JTG/D20—2006.公路路线设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004. China Communications Second Highway Survey Design and Research Institute. JTG/D20—2006. Specification for design of highway subgrades[S]. Beijing: China Communication Press, 2004.

