

文章编号: 1002-0268 (2004) 08-0009-03

# 排水性沥青路面排水性能评定方法研究

诸永宁, 陈荣生, 倪富健

(东南大学交通学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 排水性沥青路面的排水性能是此种结构最重要的性能, 本文建立了排水性路面排水表层的渗流模型, 从理论上分析研究了排水性路面排水面层的排水机理及排水性能的评价指标, 给出了各主要参数的确定方法; 介绍了自行开发的试验仪器, 并通过室内试验对排水性沥青混合料竖向和横向渗透系数的测定方法进行研究, 给出了计算公式; 设计试验方法, 对排水性沥青混合料进行室内的模拟降雨试验, 研究路面两端断面的边界条件, 找出了断面上的潜水层厚度与路面坡度及降雨强度之间的关系。

**关键词:** 排水性路面; 渗透系数; 渗流; 降雨强度

中图分类号: U416 217

文献标识码: A

## Research on Evaluation Method of Drainage Performance of the Porous Asphalt Pavement

ZHU Yong-ning, CHEN Rong-sheng, NI Fu-jian

(Transportation College, Southeast University, Jiangsu Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The drainage performance is the most important performance of the porous asphalt pavement. We set up a seepage model of the infiltration pavement of the porous asphalt pavement, and analyzed the drainage mechanism of the infiltration pavement and the evaluation index of drainage performance through theory deducing, and gave the method of determining main parameters. And we introduced the newly developed instruments, and researched the measurement of the vertical and transverse infiltration coefficient through indoor experiments, and deduced the formula. We designed the experiment, and studied the boundary condition in the transect of the pavement through indoor simulating rainfall experiment to discover the relationship among the thickness of water table in the transect and the gradient of pavement and the intensity of rainfall.

**Key words:** Porous asphalt pavement; Infiltration coefficient; Seepage; Intensity of rainfall

近年来, 随着我国公路建设的迅猛发展, 对道路的使用功能也提出了越来越高的要求。如何使路面既有足够的耐久性(避免水损害和早期损害)又具有良好的表面功能(防滑、防水漂、抑制溅水起雾、减少眩光、降低噪音)是当前我国公路界的一大难题。大孔隙排水性沥青路面, 因其良好的表层排水、抗滑及降噪功能, 日益受到重视。本文通过理论推导分析了排水性沥青路面的排水机理, 给出了排水面层内的浸润线方程和主要参数的确定方法, 并通过试验研究分析了路面两端断面上的潜水层厚度与降雨强度、路面坡度之间的内在联系。

### 1 排水性路面雨水入渗模型及理论推导

由于大气降水入渗补给或浅层潜水蒸发等因素的影响, 排水性路面面层中的潜水运动是非稳定的, 潜水面同时又是渗流区的边界。如果入渗均匀, 即大气降水的入渗在时间和空间分布上都是比较均匀的情况下, 为了简化计算, 可以把潜水的运动当作稳定运动来研究<sup>[1]</sup>。为此, 对边界条件作如下的假设: (1) 取

半幅路面作为分析对象,  $l = B \sqrt{1 + \frac{l_z^2}{l_h^2}}$  为排水长度, 其中  $B$  为半幅路面的行车道宽度; (2) 排水面层是

均质体, 且与其下部的防水层(即中面层)同坡, 综合坡度  $i = \sqrt{i_h^2 + i_z^2}$ ; 其中  $i_h$  和  $i_z$  分别为路面的横坡和纵坡坡度; (3) 上部有雨水均匀入渗, 并可用入渗强度即单位时间, 单位面积上的入渗补给量  $W$  来表示, 在此情况下,  $W$  为常数; (4) 排水层中的潜水流可视为一维流, 潜水流是渐变流并随时间的增长趋于稳定。

根据以上简化条件, 建立了如图1所示的渗流模型。以排水面层左边缘为  $y$  轴, 以排水面层右边缘层底的水平线为  $x$  轴建立如图所示的坐标系, 并假设  $x$  轴是相对标高为零的基准面, 则图中  $H$  表示潜水的相对标高,  $h$  表示潜水的厚度。由图可知, 由于路面坡度的影响任意断面上潜水水位的相对标高都等于该断面处的潜水厚度加上该断面处排水面层层底的相对标高, 即  $H_x = h_x + (l-x) \times i$ , 其中  $x$  为任意断面到左边缘起始断面的距离。此时水力坡度为  $-\frac{dH}{dx}$ , 过水断面为  $h$ 。

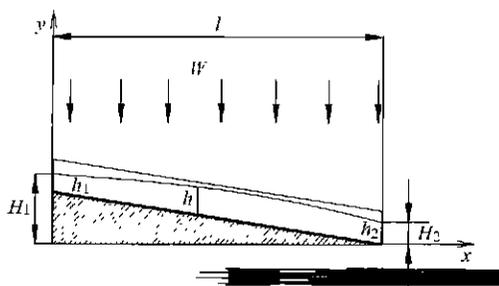


图1 平整度预测图

根据 Boussinesq 方程, 可写出数学模型如下

$$\frac{d}{dx} \left( h \frac{dH}{dx} \right) + \frac{w}{k} = 0 \quad (1)$$

$$H|_{x=0} = H_1 \quad (2)$$

$$H|_{x=l} = H_2 \quad (3)$$

式中,  $h$  为离左端起始断面  $x$  处的潜水流厚度, cm;  $H_1$ 、 $H_2$  分别为左右两端断面处潜水水位的相对标高, cm;  $w$  为入渗强度, cm/s;  $k$  为排水面层的横向渗透系数, cm/s。

对(1)式进行一次积分, 得通解

$$h \frac{dH}{dx} = -\frac{w}{k}x + C_1 \quad (4)$$

根据中值定理, 把式(4)左边的  $h$  用  $h_m = \frac{h_1 + h_2}{2}$  近似地代替, 化为

$$h_m \frac{dH}{dx} = -\frac{w}{k}x + C_1 \quad (5)$$

对式(5)再进行一次积分得

$$H = \left[ -\frac{w}{2k}x^2 + C_1x + C_2 \right] \bigg|_{h_m} \quad (6)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$  为积分常数。把边界条件式(2)和式(3)代入式(6)解得

$$C_1 = \left[ h_m H_2 + \frac{wl^2}{2k} - C_2 \right] \bigg|_{l}$$

$$C_2 = H_1 h_m$$

将  $C_1$ 、 $C_2$  代入式(6)就可以得到排水面层的浸润曲线方程(或降落曲线方程)。若已知参数  $k$ 、 $w$ , 只要测定两个断面的水位  $H_1$  和  $H_2$  就可预测路面上任意断面上的水位。如果将  $H = h + (l-x) \times i$  代入式(6), 经整理后得

$$h = \left[ -\frac{w}{2k}x^2 + C_1x + C_2 \right] \bigg|_{h_m - (l-x) \times i} \quad (7)$$

这就是排水面层沿程变化的潜水厚度方程。可见  $h$  在  $l$  范围内是一个开口向下的抛物线。将(7)式两边对  $x$  求导, 并令其等于零, 求最大值可得  $x_0 = k(ih_m + C_1) / w$ , 此处即为排水面层中潜水厚度最大的断面, 将这个  $x_0$  代入(7)式就可以得到潜水厚度的最大值  $h_{\max} = \left[ -\frac{w}{2k}x_0^2 + C_1x_0 + C_2 \right] \bigg|_{h_m - (l-x_0) \times i}$ 。如果  $h_{\max}$  大于排水面层的铺装厚度, 潜水就会漫出路面形成表面径流。

## 2 入渗强度的确定

雨水从路表垂直向下渗入排水表层是一个两阶段过程。第一阶段由外界控制, 若外界给水速率不超过下渗能力, 则入渗速率等于来水速率, 降水全部渗入排水表层, 通过在表层内的横向渗流排出路面。第二阶段为排水表层控制阶段, 随着排水表层饱和程度增加, 表层传导水的能力逐渐减弱, 当小于外界给水速率时, 开始有一部分雨水来不及下渗入排水表层, 而是通过路表综合坡度排出路面, 此时入渗速率等于表层的下渗能力, 下渗能力一直减小直至等于排水表层的饱和水力传导度<sup>[3]</sup>。

由于瞬时水力传导度是一个不稳定的变化的值, 因此应采用  $K_s$  (饱和水力传导度) 作为设计的指标, 它与排水表层的材料性质与组成形式有关, 可通过试验确定。当用式(6)对排水性路面进行水力计算时, 所采用的降雨强度不能大于排水表层竖向的饱和水力传导度(即渗透系数), 在此情况下入渗强度就是降雨强度。

## 3 渗透系数的确定

材料的渗透系数是用来衡量材料透水能力的一个

重要参数,在排水性路面结构设计中是一个关键性指标,渗透系数的测定是通过渗透仪来测定的。研究表明《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000)中路面渗水仪测定、计算渗水系数的方法不适用于大孔隙的排水性沥青混合料,需要重新设计测定的方法<sup>[4]</sup>。为了得到入渗强度我们首先要确定材料的饱和竖向渗透系数,因此我们采用了自行开发研制的排水性沥青混合料的渗透仪(图2),对混合料的饱和渗透系数进行测量。

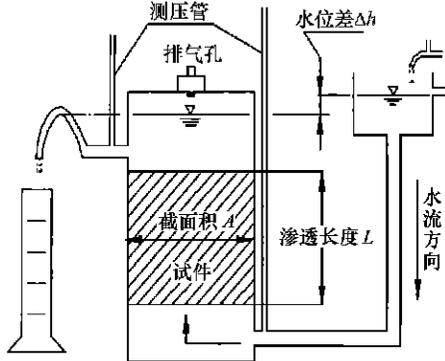


图2 渗透仪

先将试件在模筒中成型,我们采用的试件是 $\phi=15\text{cm}$ ,  $h=10\text{cm}$ 的圆柱形试件,在到达龄期后在模筒两端加上进水口和出水口,并将接口处进行密封处理;调节出水口处软管的高度,可通过测压管读出进水口和出水口的水位差 $\Delta h$ ;待出水口的出水稳定后测量出水量 $Q$ ,用下式计算混合料的竖向饱和渗透系数

$$k_y = \frac{QL}{At\Delta h} \quad (8)$$

式中, $Q$ 为时间 $t$ 秒内的渗水量; $L$ 是渗流长度; $A$ 为试件截面积; $t$ 为渗透时间; $\Delta h$ 为测压管水头差。

需要注意的是,此渗透试验测定的依据是Darcy定律的原理,因此要符合Darcy定律的适用范围才能保证试验的准确性。Darcy定律的适用范围可以用Reynolds数来表示

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (9)$$

式中, $V$ 为渗流速度; $d$ 为混合料颗粒的平均粒径; $\nu$ 为流体的运动粘度。

试验表明当Reynolds数不超过 $1\sim 10$ 时,渗流运动才符合Darcy定律。所以用渗透仪进行渗流试验时要用式(9)计算出渗流速度,然后乘上试件的截面积得出单位时间的渗流量,调整出水口软管高度使单位时间出水量满足要求后再进行测量。

根据资料显示,碾压成型的排水性沥青混合料竖

向和横向渗透系数通常是不一样的<sup>[3]</sup>,为了计算水在排水表层横向渗流的情况,我们还必须知道材料的横向渗透系数,因此我们又自行开发研制出排水性沥青混合料的横向渗透测定设备(图3)。试件的前后面和下面都用油泥密封,保证水从试件内部横向渗流,左侧为进水口右侧为出水口,我们采用的试件是 $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 5\text{cm}$ 的车辙板。横向渗透系数可用下式计算

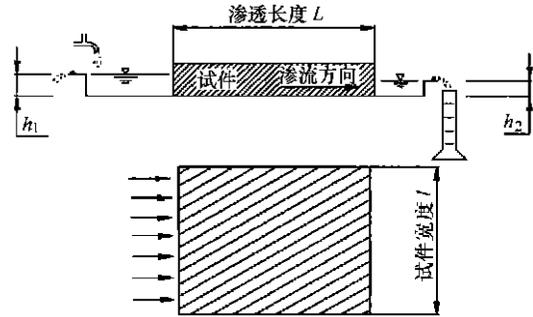


图3 横向渗透仪

$$k_x = \frac{2QL}{tl(h_1^2 - h_2^2)} \quad (10)$$

式中, $Q$ 为时间 $t$ 秒内的渗水量; $L$ 是渗流长度; $h_1$ 、 $h_2$ 分别为进水、出水口处水位标高; $t$ 为渗透时间; $l$ 为试件宽度。

同样,用此设备测定混合料横向渗流系数的时候也要满足Darcy定律的适用范围,可以用(9)式先计算出单位时间内的流量,再根据此流量控制进水口和出水口的水位标高。

#### 4 $h_1$ 和 $h_2$ 的确定

要想用式(6)对排水性路面进行水力计算,还要确定左右两端断面处的潜水层的厚度。由于目前对这两个厚度的确定还缺乏足够的理论依据,因此只能通过试验进行确定。我们采用如图1的模型模拟降雨,采用的试件是 $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 5\text{cm}$ 的一块车辙板,左侧用透明的玻璃封住以观测左端的潜水层厚度,右侧直接让它开口,在模拟降雨时观测渗水高度。

成型的混合料空隙率为 $22.1\%$ ,用竖向渗透仪测出的竖向饱和渗透系数 $K_y=0.03\text{cm/s}$ ,用横向渗流测出的横向渗透系数 $K_x=0.25\text{cm/s}$ 。模拟降雨试验结果如图4、图5所示。

由图4和图5可以看出,在同一种降雨强度下,随着坡度的增大, $h_1$ 值减小,且在 $2.5\sim 5\text{cm}$ 之间,近似成线性关系; $h_2$ 值增大,且在 $1.5\sim 3.5\text{cm}$ 之间,近似成线性关系。在同一种坡度(下转第16页)

度系数取 0.3, 抗渗性取 0.3。计算的结果见表 7。

从表 7 可看出, 对每 1 000m<sup>2</sup> 混凝土路面, 尽管羧基丁苯改性混凝土的初期造价是普通水泥混凝土的

2.72 倍, 但性能价格是普通水泥混凝土的 3.32 倍, 说明羧基丁苯改性水泥混凝土应用于路面的成本收益比小, 经济相对更加合理。

表 7 羧基丁苯掺量为 15% 的改性混凝土的性能价格计算表

聚合物类型	抗折强度		断裂韧度		耐久性能						每 1000m <sup>2</sup> 混凝土路面的造价	性能价格比	
					耐磨性		温度系数		抗渗性				综合值
	实际值	比值	实际值	比值	实际值	比值	实际值	比值	实际值	比值			
不掺	4.85	1	0.426	1	6.4	1	9.6	1	2.79	1	1	1	1
丁苯	6.69	1.4	0.692	1.62	3.8	1.7	7.62	1.26	0.281	9.93	4	2.72	3.32

#### 4 结论

(1) 掺入羧基丁苯乳液, 对普通水泥混凝土有减水作用, 且羧基丁苯聚合物改性水泥混凝土的工作性也得到改善。

(2) 羧基丁苯聚合物改性混凝土的力学性能得到提高。其抗折强度增大, 压折比降低; 动弹模量和抗折弹性模量都降低, 即刚度减小; 抗折断裂能大幅度的提高; 断裂性能得到改善。

(3) 羧基丁苯聚合物改性水泥混凝土的耐久性能得到改善。其耐磨性和抗渗性提高, 干缩率降低, 温

缩系数减小。

(4) 羧基丁苯改性混凝土的性能价格是普通水泥混凝土的 3.32 倍, 用于路面的成本收益比小, 经济相对更加合理。

#### 参考文献:

[1] 梁乃兴. 聚合物改性水泥混凝土 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.  
 [2] 李祝龙. 聚合物改性水泥混凝土路用性能的研究 [D]. 西安公路交通大学硕士论文, 1996  
 [3] 孙朝云. 现代交通测试技术——原理和应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000

(上接第 11 页)

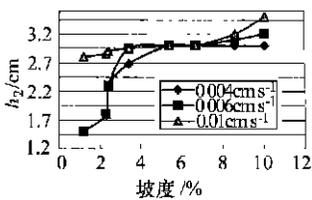
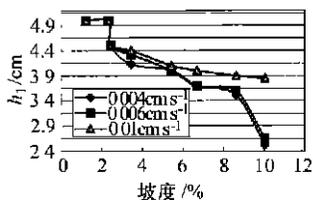


图 4 坡度与  $h_1$  的关系 图 5 坡度与  $h_2$  的关系

下, 随着降雨强度的增加,  $h_1$  和  $h_2$  值都是增大的, 但增加的幅度不是很明显; 另外, 试验中在我们所模拟的降雨强度下, 试件表面无明显径流, 出水口处 3~4cm 的地方明显比其它地方含水量要小。当我们用 2 块车辙板进行模拟即把渗流长度增加 1 倍时发现原来没有明显表面径流的大的降雨强度已经明显有径流产生, 这与式 (6) 所反映的情况完全吻合, 再一次证明了公式的正确性。同时, 当渗流长度增加时  $h_1$  和  $h_2$  与降雨强度和坡度的关系基本保持不变。

#### 5 结语

本文的理论分析和试验研究的结果较为一致, 为

排水性路面排水性能的研究奠定了基础。文中设计渗透系数的试验方法有理论依据, 试验的结果稳定, 具有一定实用意义, 可以进一步改进和完善。必须指出, 模拟降雨试验的观测十分困难, 本文所得仅是反映规律性的定性的观测, 并不能精确给出关系式, 对于  $h_1$  和  $h_2$  也只给出范围并不能给出具体计算公式, 因而也有待今后进一步研究。

#### 参考文献:

[1] 薛禹群. 地下水动力学 [M]. 地质出版社, 1997.  
 [2] 冯杰. 水及溶质在有大孔隙的土壤中运移机制研究 [D]. 河海大学, 2001.  
 [3] 日本道路协会. 排水性铺装技术指针 (案) [M]. 东京: 丸善株式会社, 1996  
 [4] 冷真. 排水性沥青混合料级配组成设计及性能研究 [D]. 东南大学, 2003.