

文章编号:1671-8879(2016)01-0021-07

多孔沥青路面渗水性能衰变规律

周 韡¹, 黄晓明¹, 梁彦龙¹, 尚 波²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 西安公路养护技术工程研究中心, 陕西 西安 710075)

摘 要:为了研究多孔沥青路面渗水性能的衰变规律,基于多孔沥青路面实际的粉尘累积过程与粒径分布,在开发的多孔沥青混合料渗水性能测试仪上进行了粉尘堵塞模拟试验,获得了不同空隙率多孔沥青混合料渗水系数衰变规律;根据路面粉尘分布与流动规律以及空隙结构衰变规律,建立了多孔沥青路面渗水系数衰变预测模型。研究表明:多孔沥青混合料渗水系数残留率与堵塞颗粒的质量成线性关系,渗水系数衰变速率与初始空隙率成正比;在实际使用过程中,多孔沥青路面渗水系数的衰变与过滤系数、颗粒累积速率、使用时间以及与路中线距离有关,其中轮迹带及外侧车道渗水系数衰变较快。

关键词:道路工程;多孔沥青路面;渗水系数;粉尘堵塞;预测模型

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

Permeability performance decay law of porous asphalt pavement

ZHOU Wei¹, HUANG Xiao-ming¹, LIANG Yan-long¹, SHANG Bo²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Xi'an Highway Maintenance Technology Institute, Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to analyze the permeability performance decay law of porous asphalt pavement, a dust clogging test was conducted on an instrument which was developed to analyze the permeability of porous asphalt mixtures based on the actual accumulation process and particle size distribution of dust in the porous asphalt pavement. The decay laws of permeability coefficient of porous asphalt mixtures with different porosities were obtained from the test. According to the dust distribution and its flow law, and voids structure decay law, the permeability decay prediction model of porous asphalt pavement was established. The results show that the residual rate of permeability coefficient has a linear relationship with the quality of blocking particles. The decay rate of permeability coefficient is proportional to the initial porosity. For the actual porous asphalt pavement, the decay law of permeability coefficient is related to the filtration coefficient, dust accumulation rate, service time and the distance from the road centerline. Especially, the drainage performance reduces rapidly in wheel track and outside lane. 1 tab, 7 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; porous asphalt pavement; permeability coefficient; dust clogging; prediction model

收稿日期:2015-08-10

基金项目:交通运输部科技项目(2011318221430);国家自然科学基金项目(51378121)

作者简介:周 韡(1985-),男,江苏邳州人,工学博士研究生,E-mail:lygzhouw@126.com。

0 引言

多孔沥青路面是一种铺设在路面结构上面层的功能型路面,其通常采用开级配设计,空隙率较大,一般为 $18\%\sim 25\%$,因此具有良好的渗水性能,可有效减少路面积水,避免因积水引起的水雾、水溅、水漂及夜间眩光现象,提高了行车的安全性^[1-11]。但在实际使用过程中,多孔沥青路面空隙结构的衰变与粉尘颗粒的堵塞,将影响其渗水性能,而渗水性能的衰变规律是多孔沥青路面在推广以及养护决策中亟待解决的一个重要问题^[12-17]。目前,对于多孔沥青路面渗水性能衰变规律的研究主要为现场长期观测及模拟试验研究。Gonzalez 等研究表明,压实状况对多孔沥青路面的渗透性能有显著的影响,当压实度较大时,路面的渗透系数明显降低^[18];Coleri 等研究表明,多孔沥青路面渗透系数的衰减与其空隙结构的衰减有明显的相关性^[19];Tan 等通过室内试验研究表明,多孔沥青混合料试件的渗透系数与堵塞过程中残留在试件内部的颗粒质量呈二次函数关系^[20];Moriyoshi 等对多孔沥青路面进行了 14 年的长期观测,并跟踪测量其渗透系数的变化情况,观测结果表明,通车后渗透系数逐渐下降,2 年后达到稳定的残留渗透系数^[21];蒋甫通过对实体工程的现场长期监测以及室内试验,研究了多孔沥青路面的渗水性能与通车时间及空隙率之间的关系,指出多孔沥青路面的渗水性能随通车运营时间的增加呈线性降低趋势^[22]。

综合来看,以往研究只考虑了空隙结构衰变或堵塞作用单一因素对多孔沥青路面渗水性能的影响,没有进行综合分析,并且主要集中在现象的描述上,缺乏理论研究。为此,本文根据多孔沥青路面实际粉尘颗粒累积过程、颗粒流动分布规律以及空隙结构衰变规律,通过室内堵塞试验结合理论分析,建立多孔沥青路面渗水系数衰变模型。

1 渗水性能衰变试验

1.1 路面粉尘累积

多孔沥青路面粉尘颗粒的主要来源是风力、水流等自然力作用下的漂浮-移动-沉积,车辆或人的携带-散落。由于降雨天数有限,在多孔沥青路面实际使用过程中,粉尘颗粒的积累过程为:

(1)自然界中的粉尘颗粒在风力的带动下,最终飘落沉降在多孔沥青路面表面,车辆和人类活动将一些较大粒径的颗粒带入多孔沥青路面表面,这些

粉尘颗粒在风力和重力的作用下进入多孔沥青路面表层的空隙中,在这一过程中,多孔沥青路面中粉尘颗粒的含量逐渐增加;

(2)降雨发生时,雨水径流会携带一定浓度的粉尘颗粒进入多孔沥青路面;

(3)在水流的作用下,多孔沥青路面内原本存在的部分粉尘颗粒被带动,沿着道路坡度在多孔沥青路面内部空隙中运动,沉积堵塞在多孔沥青路面内,或者随水流流出多孔沥青路面。

上述过程可以看作多孔沥青路面粉尘颗粒累积循环,在经历一定次数的循环后,颗粒堵塞储存在多孔沥青路面内部,造成多孔沥青路面渗水性能的衰减。

1.2 试验仪器

为了研究多孔沥青路面的渗水性能,设计开发了多孔沥青混合料渗水性能测试仪,如图 1 所示,仪器由储水箱、水泵、喷头、流速表、流速控制阀门、试件密封夹具、支架等组成。

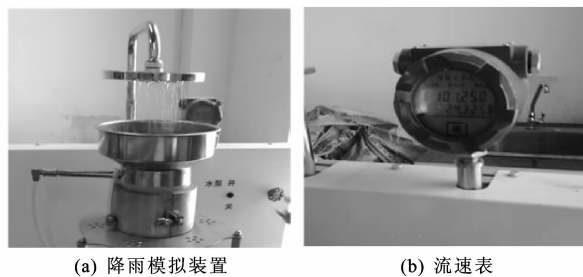


图 1 多孔沥青混合料渗水性能测试仪

Fig. 1 Permeability test instrument for porous asphalt mixture

流速表可以读取瞬时流速与累积流速,所用的试件为大马歇尔试件,为了模拟多孔沥青路面的实际厚度,制作的马歇尔试件的高度大约为 5 cm。试验时将大马歇尔试件放入密封夹具中加紧,夹具内壁为密封橡胶材料,可以保证试件侧向密封。在试件上表面夹具内侧做标记,打开水阀并逐渐调整流速,使水位稳定在标记处,模拟降雨在路面产生水膜时的情况,通过流速表读取瞬时流速作为多孔沥青混合料的渗水系数 $C(\text{mL}/\text{min})$ 。

1.3 试验步骤

为了尽可能准确地模拟多孔沥青路面实际堵塞过程以及渗水性能的衰变规律,设计试验步骤如下。

(1)成型设计空隙率分别为 18% 、 20% 、 22% 与 24% ,高度为 5 cm 的大马歇尔试件,每个空隙率制作 4 块,通过体积法实测试件的空隙率,将成型的试件固定在多孔沥青混合料渗水性能测试仪上,测量试件的渗水系数 C 。

(2)成型设计空隙率分别为 18%、20%、22%与 24%的车辙板试件,通过体积法实测试件的空隙率,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中《沥青混合料渗水试验》(T0730—2011)的要求,采用变水头渗水仪测试多孔沥青混合料车辙板的渗水系数 C_w [23]。

(3)准备堵塞颗粒材料。研究表明,散布在多孔沥青路面表面的颗粒以粒径 0.25 mm 以下的粉尘为主,其中小于 0.075 mm 的比例在 50% 左右 [24-25]。选取 0.3 mm 以下的细集料作为堵塞颗粒,设计的堵塞颗粒粒径分布见表 1。

(4)根据路面颗粒累积速度估算,称取堵塞颗粒 2.5 g,均匀播撒在试件表面,开启仪器模拟降雨条件,调节流速控制阀门使水位始终稳定在标记处;当累积流量达到 5 L 或流速稳定时停止洒水,等到试件不再滴水时再次播撒堵塞颗粒 2.5 g 后洒水;当累积颗粒质量达到 10 g 或 10 g 的倍数时,以最终的瞬时流速作为渗水系数 C 。

(5)每个空隙率的试件进行 4 组平行试验。

表 1 堵塞颗粒粒径分布

Tab. 1 Particle size distribution of clogging particles

粒径/mm	<0.075	0.075~0.150	0.150~0.300
质量百分比/%	50	25	25

2 试验数据与分析

变水头渗水仪测试获得的不同空隙率车辙板初始渗水系数 C_{w0} 与空隙率的关系如图 2 所示。

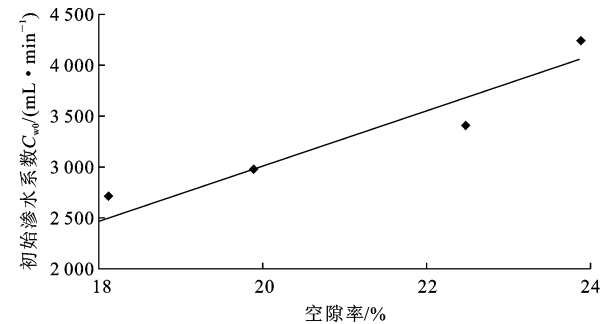


图 2 初始渗水系数与空隙率关系

Fig. 2 Relationship between initial permeability coefficient and porosity

由图可以看出,多孔沥青混合料的初始渗水系数与空隙率具有很好的线性相关性。

C_{w0} 拟合公式为

$$C_{w0}=275.9I_{VV}-2\,490.8 \quad R^2=0.964\,1 \quad (1)$$

式中: VV 为空隙率(%); I_{VV} 为 VV 的计算参数。

换算为相同空隙率试件,变水头渗水仪测试的

渗水系数 C_w 与通过多孔沥青混合料渗水性能测试仪测得的渗水系数 C 具有较好的相关性,如图 3 所示。

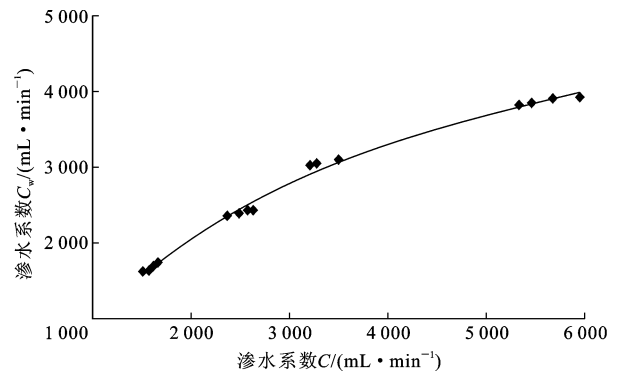


图 3 不同测试方法测得的渗水系数

Fig. 3 Permeability coefficient by different test methods

C_w 拟合公式为

$$C_w=1\,325.7\ln(C)-7\,287.1 \quad R^2=0.988\,8 \quad (2)$$

由于《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)、《公路路基路面现场测试规程》(JTGE60—2008)中规定的沥青路面渗水系数测试采用的仪器为变水头渗水仪,为了便于实际工程中应用,将通过多孔沥青混合料渗水性能测试仪测得的渗水系数 C ,通过式(2)转化为变水头渗水仪测量的渗水系数 C_w ,渗水系数的衰变通过渗水系数残留率 α 表示

$$\alpha=\frac{C'_w}{C_{w0}}\times 100\% \quad (3)$$

式中: C'_w 、 C_{w0} 分别为堵塞后的渗水系数与初始渗水系数(mL/min)。

试验获得的不同空隙率的多孔沥青混合料渗水系数残留率与堵塞颗粒质量之间的关系如图 4。

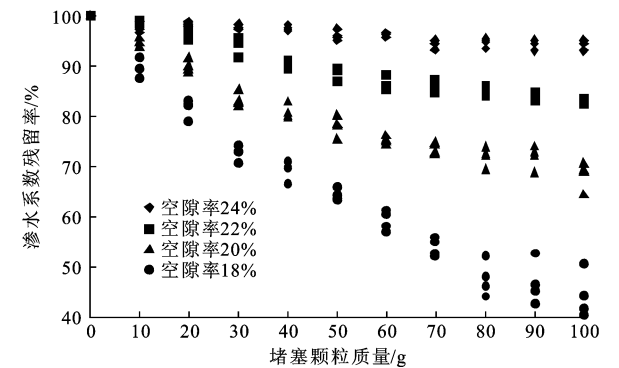


图 4 渗水系数残留率与堵塞颗粒质量关系

Fig. 4 Relationship between residual rate of permeability coefficient and clogging particles mass

由图可知,不同空隙率条件下,渗水系数残留率与堵塞颗粒的质量基本成线性关系,拟合公式为

$$\alpha_{24} = -0.0592m + 100 \quad R^2 = 0.9386 \quad (4)$$

$$\alpha_{22} = -0.2019m + 100 \quad R^2 = 0.8931 \quad (5)$$

$$\alpha_{20} = -0.4421m + 100 \quad R^2 = 0.9328 \quad (6)$$

$$\alpha_{18} = -0.6797m + 100 \quad R^2 = 0.9052 \quad (7)$$

式中: α_{24} 为空隙率 24% 的试件的渗水系数残留率,下标表示不同的空隙率; m 为堵塞颗粒的质量(g)。

从拟合公式可以看出,初始空隙率主要影响的是渗水系数残留率衰变斜率,渗水系数残留率衰变斜率与初始空隙率的关系如图 5 所示。

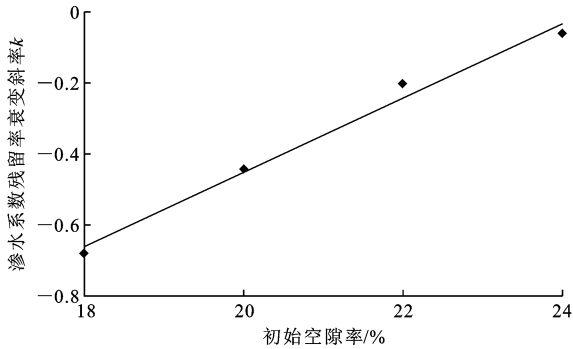


图 5 渗水系数残留率衰变斜率与初始空隙率关系

Fig. 5 Relationship between decay slope of permeability coefficient residual rate and initial porosity

渗水系数残留率衰变斜率 k 的拟合公式为

$$k = 0.1051I_{VV} - 2.5525 \quad R^2 = 0.9877 \quad (8)$$

联合式(4)~式(8),渗水系数残留率衰变规律可以统一为

$$\alpha = (0.1051I_{VV} - 2.5525)m + 100 \quad (9)$$

将式(1)、式(9)带入式(3)得

$$C_w = 0.29I_{VV}^2m - 9.66I_{VV}m + 275.9I_{VV} + 63.57m - 2490.8 \quad (10)$$

3 渗水性能衰变模型

3.1 路面粉尘分布

因为多孔沥青路面设有横坡,落入多孔沥青路面的颗粒会随水流沿坡度流向路侧,因此沿路面坡度不同位置所流经的颗粒质量不同,如图 6 所示。

设单侧路面宽度为 L ,取路面长度为 1,定义多孔沥青路面的过滤率为 λ ,表示含颗粒流体通过单位长度的多孔沥青路面时颗粒的去除量与原颗粒质量的比值,即

$$\lambda = \frac{\Delta m}{ml} \quad (11)$$

式中: Δm 为残留在多孔沥青路面内的颗粒质量

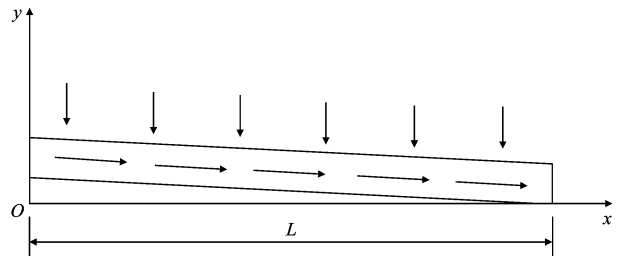


图 6 多孔沥青路面示意

Fig. 6 Schematic of porous asphalt pavement

(g); m 为流入多孔沥青路面的颗粒总质量(g); l 为颗粒流经多孔沥青路面的长度(m)。

设路面某处距路中线的距离为 x ,将路面宽度分为 n 等份,每段宽度为 Δx ,路面散布的颗粒浓度为 $a(\text{g}/\text{m}^2)$,则每段宽度为 Δx 路面的散布颗粒质量为 $a\Delta x$ 。

路中线向路侧方向第 1 个 Δx 宽度内,流经的颗粒质量为

$$m_1 = a\Delta x \quad (12)$$

第 2 个 Δx 宽度内,流经的颗粒质量为

$$m_2 = a\Delta x + (1 - \Delta x\lambda)a\Delta x \quad (13)$$

第 3 个 Δx 宽度内,流经的颗粒质量为

$$m_3 = a\Delta x + [a\Delta x + (1 - \Delta x\lambda)a\Delta x](1 - \Delta x\lambda) = a\Delta x + (1 - \Delta x\lambda)a\Delta x + (1 - \Delta x\lambda)^2a\Delta x \quad (14)$$

以此类推,第 n 个 Δx 宽度内,流经的颗粒质量为

$$m(n) = a\Delta x + (1 - \Delta x\lambda)a\Delta x + (1 - \Delta x\lambda)^2a\Delta x + \dots + (1 - \Delta x\lambda)^{n-1}a\Delta x = a \frac{1 - (1 - \Delta x\lambda)^n}{\lambda} \quad (15)$$

由于 $\Delta x = \frac{x}{n}$,则有

$$m(n) = a \frac{1 - (1 - \lambda x/n)^n}{\lambda} \quad (16)$$

当 n 取无穷大时,有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} m(n) = \frac{a(1 - e^{-\lambda x})}{\lambda} \quad (17)$$

则圆心距离路中线 x 处,半径为 r 的圆形区域,流经的颗粒质量为

$$m(x) = \pi r^2 a + \frac{2ra(1 - e^{-\lambda x})}{\lambda} \quad (18)$$

通过变水头渗水试验仪测试渗水系数时,与渗水试验仪接触的圆形区域的半径为 0.075 m,有

$$m(x) = 1.77 \times 10^{-2}a + \frac{0.15a(1 - e^{-\lambda x})}{\lambda} \quad (19)$$

路面的颗粒浓度是随时间变化的,设散播在路面的颗粒浓度累积系数为 $c(\text{g}/(\text{d} \cdot \text{m}^{-2}))$ 。由于多孔沥青路面表面具有较多开口空隙,落入多孔沥青

路面的粉尘颗粒一般很难再被风力等作用带走,因此可以假设路面颗粒浓度是线性增加的,即

$$a = ct \quad (20)$$

将式(20)代入式(19),可以得到 t 时间内流经多孔沥青路面与渗水试验仪接触的圆形区域的颗粒质量为

$$m(x) = 1.77 \times 10^{-2} ct + \frac{0.15ct(1-e^{-\lambda x})}{\lambda} \quad (21)$$

3.2 衰变模型

多孔沥青路面渗水系数的衰变是荷载作用下空隙结构的衰变与粉尘颗粒堵塞共同作用的结果,有

$$C_w(t) = C_{w0} - \Delta C_{w1}(t) - \Delta C_{w2}(t) \quad (22)$$

式中: $C_w(t)$ 为使用 t 时间后的渗水系数 (mL/min); $\Delta C_{w1}(t)$ 为荷载作用所引起的渗水系数的减少量 (mL/min); $\Delta C_{w2}(t)$ 为粉尘堵塞引起的渗水系数的减少量 (mL/min)。

根据式(1),可以通过空隙率计算多孔沥青路面的渗水系数,因此,荷载作用引起的渗水系数的减少量为

$$\Delta C_{w1}(t) = 275.9(I_{VV_0} - I_{VV(t)}) \quad (23)$$

式中: VV_0 为初始空隙率 (%); I_{VV_0} 为 VV_0 的计算参数; $VV(t)$ 为使用 t 时间后的空隙率; $I_{VV(t)}$ 为 $VV(t)$ 的计算参数。

将使用时间 t 分为 n 等份

$$dt = \frac{t}{n} \quad (24)$$

在使用过程中,空隙率是不断下降的,当时间 dt 很小时,可以认为空隙率不变,空隙率与堵塞颗粒质量看成是时间 t 的函数。联合式(1)与式(9), dt 时间内粉尘堵塞引起的渗水系数的减少量为

$$\Delta C_{w2} dt = (-0.29 I_{VV(t)}^2 + 9.66 I_{VV(t)} - 63.57) m dt \quad (25)$$

根据式(21),每个 dt 时间内,流经多孔沥青路面与渗水试验仪接触圆形区域的颗粒质量为

$$m(x) = \left[1.77 \times 10^{-2} c + \frac{0.15c(1-e^{-\lambda x})}{\lambda} \right] dt \quad (26)$$

则在使用 t 时间后,粉尘堵塞引起的渗水系数的减少量为

$$\Delta C_{w2}(x, t) = \left[1.77 \times 10^{-2} c + \frac{0.15c(1-e^{-\lambda x})}{\lambda} \right] \cdot \int_0^t (-0.29 I_{VV(t)}^2 + 9.66 I_{VV(t)} - 63.57) dt \quad (27)$$

将式(1)、式(23)、式(27)代入式(22),可以得到多孔沥青路面渗水系数衰变模型为

$$C_w(x, t) = 275.9 I_{VV(t)} - 2490.8 +$$

$$\left[1.77 \times 10^{-2} c + \frac{0.15c(1-e^{-\lambda x})}{\lambda} \right] \cdot \int_0^t (0.29 I_{VV(t)}^2 - 9.66 I_{VV(t)} + 63.57) dt \quad (28)$$

对于多孔沥青路面非轮迹带,可以认为空隙率是常数,始终等于初始空隙率,则多孔沥青路面非轮迹带渗水系数衰变模型为

$$C_w(x, t) = 275.9 I_{VV_0} - 2490.8 + \left[1.77 \times 10^{-2} ct + \frac{0.15ct(1-e^{-\lambda x})}{\lambda} \right] \cdot (0.29 I_{VV_0}^2 - 9.66 I_{VV_0} + 63.57) \quad (29)$$

对于多孔沥青路面轮迹带,渗水系数衰变规律还与空隙率随时间的衰变规律有关。假设第 1 年空隙率随使用时间线性衰减,衰变规律为

$$I_{VV(t)} = -0.0012t + 21.6 \quad (30)$$

将式(30)代入式(27),可以得到多孔沥青路面轮迹带渗水系数衰变模型为

$$C_w(x, t) = 3479.676 - 0.331t + \left[1.77 \times 10^{-2} c + \frac{0.15c(1-e^{-\lambda x})}{\lambda} \right] \cdot (1.392 \times 10^{-7} t^3 - 1.735 \times 10^{-3} t^2 - 9.668t) \quad (31)$$

空气质量重度污染降尘量为 $30 \text{ t}/(\text{m} \cdot \text{km}^{-2})$, 换算为颗粒浓度累积系数为 $1 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^{-2})$ 。设单向 3 车道多孔沥青路面的初始空隙率为 21.6% , 单侧路面宽度为 12 m , 距离路中线 $1, 3, 5, 7, 9$ 和 11 m 为轮迹带, 多孔沥青路面的过滤率为 $0.5/\text{m}$ 。根据式(29)、式(31)获得不同使用时间后的路面渗水系数如图 7 所示。

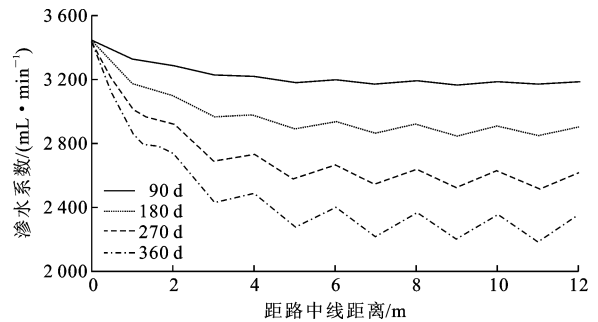


图 7 不同使用时间多孔沥青路面路面渗水系数
Fig. 7 Permeability coefficients of porous asphalt pavement in different service times

从图 7 可以看出,随着使用时间的增加,多孔沥青路面不同位置的渗水系数都在下降,其中外侧路面渗水系数下降较快。同时轮迹带渗水系数的下降速度也快于非轮迹带,使用时间越长,轮迹带与非轮迹带渗水系数的差距也越大,因此对于车道较多,宽度较大的多孔沥青路面,轮迹带与外侧车道的渗水

系数是检测与养护的重点。

4 结 语

(1)根据路面实际粉尘颗粒累积过程、粉尘分布与流动规律以及空隙结构衰变规律,建立了多孔沥青路面渗水系数衰变预测模型,为多孔沥青路面养护决策提供依据。

(2)通过渗水性能衰变试验研究,可知渗水系数残留率与堵塞颗粒的质量基本成线性关系,渗水系数衰变速率与初始渗水系数成正比。

(3)在实际使用过程中,多孔沥青路面的渗水系数衰变与过滤系数、颗粒累积速率、使用时间以及与路中线距离有关,其中轮迹带和外侧车道渗水系数衰变较快。

(4)多孔沥青路面的实际使用环境差异较大,本文建立的多孔沥青路面渗水系数衰变模型还需要进一步实际工程校验,并对其可靠性进行进一步完善。

参考文献:

References:

- [1] ELVIK R, GREIBE P. Road safety effects of porous asphalt: a systematic review of evaluation studies[J]. Accident Analysis and Prevention, 2005, 37(3): 515-522.
- [2] 裴建中, 张嘉林, 常明丰. 矿料级配对多孔沥青混合料分布特性的影响[J]. 中国公路学报, 2010, 23(1): 1-6.
PEI Jian-zhong, ZHANG Jia-lin, CHANG Ming-feng. Influence of mineral aggregate gradation on air void distribution characteristic of porous asphalt mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(1): 1-6. (in Chinese)
- [3] 邹艳琴, 陈 博, 陶家朴. 多孔排水沥青路面[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(11): 43-46.
ZOU Yan-qin, CHEN Bo, TAO Jia-pu. Porous drainage asphalt pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(11): 43-46. (in Chinese)
- [4] PUTMAN B J, KLINE L C. Comparison of mix design methods for porous asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(11): 1359-1367.
- [5] POULIKAKOS L D, GILANI S M, DEROME D, et al. Time resolved analysis of water drainage in porous asphalt concrete using neutron radiography[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2013, 77(7): 5-13.
- [6] RODRIGUES-HERNANDEZ J, CASTRO-FRESNO D, FERNANDEZ-BARRERA A, et al. Characterization of Infiltration capacity of permeable pavements

- with porous asphalt surface using Cantabrian fixed infiltrometer [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(5): 597-603.
- [7] AL-BUBAEI A M, STENGLEIN A L, VIKLANDER M, et al. Long-term hydraulic performance of porous asphalt pavements in northern Sweden [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(6): 499-505.
- [8] TAN S A, FWA T F, CHUAI C T. Automatic field permeameter for drainage properties of porous asphalt mixes [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1999, 27(1): 57-62.
- [9] CHEN Fei, ZHU Ya-zhou, YANG Jun, et al. Field performance assessment of porous asphalt pavement under heavy traffic on Yan-Tong expressway in China [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(7): 1-6.
- [10] LODICOA D M, REYFFB J A. Long-term noise performance of open graded asphalt concrete (OGAC)-results of 10-year long study [J]. Noise Control Engineering, 2009, 57(2): 84-93.
- [11] TREVINO M, DOSSEY T. On-board sound intensity testing of PFC pavements in Texas [J]. Noise Control Engineering, 2009, 57(2): 94-103.
- [12] 张东宝. 沥青路面渗水的危害及防治 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(3): 58-60.
ZHANG Dong-bao. Water seepage hazard and prevention of asphalt pavement [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(3): 58-60. (in Chinese)
- [13] ROBERT M R, THOMAS P B, JAMES J H, et al. Water quality and hydrologic performance of a porous asphalt pavement as a storm-water treatment strategy in a cold climate [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(1): 81-89.
- [14] RUNGRUANGVIROJN P, KANITPONG K. Measurement of visibility loss due to splash and spray: porous, SMA and conventional asphalt pavements [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2010, 11(6): 499-510.
- [15] GRUBER I, ZINOVIK I, HOLZER L, et al. A computational study of the effect of structural anisotropy of porous asphalt on hydraulic conductivity [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36(11): 66-77.
- [16] YONG C F, MCCARTHY D T, DELETIC A. Predicting physical clogging of porous and permeable pavements [J]. Journal of Hydrology, 2013, 481(4): 48-55.
- [17] 周 犇, 黄晓明. 多孔沥青路面空隙衰变离散元模拟 [J]. 中国公路学报, 2014, 27(7): 10-16, 84.
ZHOU Wei, HUANG Xiao-ming. Simulation of void

- reduction in porous asphalt mixture based on discrete element method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(7): 10-16, 84. (in Chinese)
- [18] GONZALEZ-ANGULLO N, CASTRO D, RODRIGUEZ-HERNANDEZ J, et al. Runoff infiltration to permeable paving in clogged conditions[J]. Urban Water Journal, 2008, 5(2): 117-124.
- [19] COLERI E, KAYHANIAN M, HARVEY J T, et al. Clogging evaluation of open graded friction course pavements tested under rainfall and heavy vehicle simulators[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 129(18): 164-172.
- [20] TAN S A, FWA T F, GUWE V Y K. Laboratory measurements and analysis of clogging mechanism of porous asphalt mixes[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2000, 28(3): 207-216.
- [21] MORIYOSHI A, JIN T, NAKAI T, et al. Evaluation methods for porous asphalt pavement in service for fourteen years[J]. Construction and Building Materials, 2013, 42(9): 190-195.
- [22] 蒋 甫. 排水性沥青混凝土路面渗水性能及其衰变规律[J]. 公路, 2012(6): 124-127.
- JIANG Fu. Permeability performance and its decay law of drainage asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2012(6): 124-127. (in Chinese)
- [23] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- JTG E20—2011, Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [24] 左晓俊, 傅大放, 李 贺. 不同类型降雨公路径流中颗粒粒径及污染物的分布特性[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2011, 41(2): 411-415.
- ZUO Xiao-jun, FU Da-fang, LI He. Distribution characteristics of particle size and pollutants in road runoff during different types of rainfall[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2011, 41(2): 411-415. (in Chinese)
- [25] 张东宝. 沥青路面渗水的危害及防治[J]. 筑路机械与施工机械化, 2008, 25(3): 58-60.
- ZHANG Dong-bao. Water seepage hazards and prevention of asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2008, 25(3): 58-60.

(上接第20页)

- [19] 尹贻林, 张金辉. 基于BQ模式下业主方全过程动态造价管理[J]. 沈阳建筑大学学报: 社会科学版, 2009, 11(4): 441-444.
- YIN Yi-lin, ZHANG Jin-hui. The dynamic cost management of total process of the owner based on BQ mode[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Social Science, 2009, 11(4): 441-444. (in Chinese)
- [20] 王首绪, 乔 鹏, 张征争, 等. 基于线性回归分析的定额测定消耗量推算研究[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(1): 19-22.
- WANG Shou-xu, QIAO Peng, ZHANG Zheng-zheng, et al. Difference research in quota consumption based on regression analysis[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(1): 19-22. (in Chinese)
- [21] 丛卓红, 吴正莺, 郑南翔, 等. 高速公路养护预算定额测定对象的优选方法[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(4): 823-827.
- CONG Zhuo-hong, WU Zheng-ying, ZHENG Nan-xiang, et al. Optimum selecting method in determination object of expressway maintenance budget quota[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(4): 823-827. (in Chinese)
- [22] 孙三民, 程兴新. 公路工程定额人工费标准研究和确定方法[J]. 公路, 2008(3): 107-112.
- SUN San-min, CHENG Xing-xin. A study on labour cost standard in highway engineering quotas and determination method[J]. Highway, 2008(3): 107-112. (in Chinese)
- [23] 刘 燕, 钱育锋, 马海燕, 等. 基于区间值模糊推理的公路工程定额拟定[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, 33(4): 142-146.
- LIU Yan, QIAN Yu-feng, MA Hai-yan, et al. Method for highway engineering quota formulation based on interval-valued fuzzy reasoning theory[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(4): 142-146. (in Chinese)
- [24] 柯 洪, 周付彦. 公路工程造价管理绩效评价指标体系研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(12): 48-54, 68.
- KE Hong, ZHOU Fu-yan. Research on performance evaluation index system of highway construction cost management[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(12): 48-54, 68. (in Chinese)
- [25] 张智慧, 何倩儒. 高速公路标段划分对工程造价的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(6): 830-833.
- ZHANG Zhi-hui, HE Qian-ru. Impact of packaging on the cost of highway construction projects[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2010, 50(6): 830-833. (in Chinese)