

# 透水沥青混合料渗水系数衰变规律研究

于保阳<sup>1,2</sup>, 刘宇鹏<sup>3</sup>, 刘美鸥<sup>1</sup>, 陈希栋<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学 交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连海事大学 交通运输装备与海洋工程学院, 辽宁 大连 116026;

3. 上海市市政工程设计研究总院集团广东有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:**透水沥青路面具有大空隙的特征,在改善路面排水、保障雨天行车安全性等方面具有显著的优势,但同样由于其较大的空隙率、粉尘堵塞以及车辆荷载等易造成空隙的衰减,导致排水功能降低。为了研究透水沥青混合料在颗粒堵塞与击实条件下渗水系数的衰减规律,以流体动力学为基础理论,建立透水沥青路面渗水系数衰变模型,用于预测透水沥青路面随时间变化经历空隙堵塞与行车作用时的渗水系数变化规律。研究表明:透水沥青混合料渗水系数的衰变速度与空隙堵塞质量和压实次数呈指数关系;在实际使用过程中,透水沥青路面渗水系数的衰变速度与初始空隙率、使用时间、粉尘颗粒累积速度、过滤系数、压实次数具有直接关系。

**关键词:** 透水沥青路面; 渗水系数; 空隙堵塞; 压实作用; 预测模型

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

透水沥青混合料是一种经常铺筑在道路表面层的功能型材料,与普通密集配沥青混合料相比,具有改善路面排水、有效减少路面积水引起的水雾等诸多优势,同时也有降低噪音和路表温度的特点<sup>[1-3]</sup>。透水沥青混合料空隙率较大,一般在20%左右,在长期使用过程中,灰尘、石屑会随着风力、降水等因素进入路面空隙中发生堵塞,同时经历车辆的碾压作用,从而造成渗水系数的衰减,影响路面排水效果,对行车的安全性产生一定影响。因此,透水沥青路面渗水系数的衰变,是其在使用和推广上一项亟待解决的重要问题<sup>[4-9]</sup>。

不同级配、不同油石比的沥青混合料,其空隙的分布形式和空间大小也有较大差异<sup>[10-11]</sup>,因此抗堵塞性能、空隙衰变程度也都具有较大区别,渗水系数的测试方法也不尽相同。Tan等<sup>[12]</sup>通过室内试验研究发现,多孔沥青混合料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;Gonzalez等<sup>[13]</sup>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;Kuang等<sup>[14]</sup>对排水沥青混合料空隙率与渗透系数之间的关系进行了研究,发现排水沥青混合料空隙率大小对其渗透系数大小起决定性作用;Neville等<sup>[15]</sup>研究了透水路面的渗透能力随时间增长而下降的变化规律;Montes等<sup>[16]</sup>采用变水头渗透试验,通过记录试验过程中水头差随时间变化的方法得出渗透系数;Ala-

lea等<sup>[17]</sup>则通过变水头试验方法进行了现场渗透性试验,通过测定水流下降至规定的渗透深度所需要的时间得到渗透系数;肖鑫<sup>[18]</sup>提出路面厚度、路面综合坡度、面层材料渗透系数的增长和渗流长度的减小可以提高路面的排水能力。

随着使用时间的增长以及车辆荷载的不断作用,透水沥青混合料的空隙率发生了衰减,进而导致渗水系数的降低。目前,国内外研究大多只对渗水系数单一因素进行分析,没有对多因素作用下的渗水系数衰变规律进行研究。基于此,该文以空隙率为基础,以渗水系数为评判标准,综合考虑时间、粉尘颗粒累积速度、过滤系数、压实次数等因素,进行透水沥青混合料空隙衰变规律的探究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

郑求才等<sup>[19]</sup>经研究得出2.36 mm以下集料含量对空隙率有很大影响,同时宜合理控制0.3~5 mm集料含量。为了得到具有较佳排水功能和良好使用性能的矿料级配,并综合考虑实用性与合理性,参考安徽省六潜高速公路选用的OGFC-13试验级配(图1),拟定研究混合料的设计级配范围<sup>[20]</sup>。按照该级配选用油石比4.5%、5.1%、5.7%拌和制成试件的空隙率分

别为19%、21%、24%。

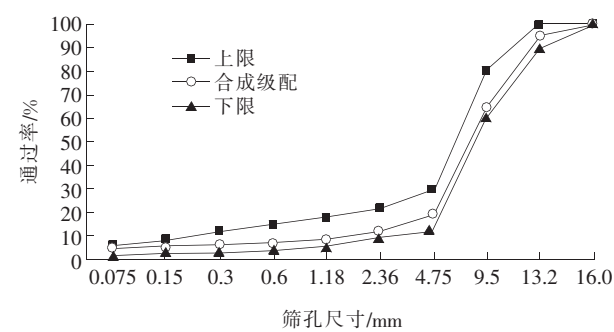


图1 透水沥青混合料(OGFC-13)级配合成结果

1.2 试验方法的确定

为了研究透水沥青路面的渗水系数变化规律,采用常水头马歇尔试件渗水系数测量装置。操作步骤如下:

- (1) 为了确保试验的可行性与准确性,马歇尔试件不做脱模处理。
- (2) 将试验装置两侧垫起并保持水平,露出中央处小孔。未脱模的马歇尔试件置于装置中间位置。
- (3) 用连接流速表的水管向装置内注水,使水平面一直保持在刻度处。
- (4) 此时,流速表中所显示的数值即为测得的该试件常水头渗水系数。

与传统渗水系数测试方法相比,马歇尔试件常水头渗水系数测试方法具有简易方便、操作简单、准确性高的优点。

1.3 试验方法的验证

- (1) 制作成型空隙率为19%、21%、24%的马歇尔试件,测试其常水头渗水系数。
- (2) 制作成型空隙率为19%、21%、24%的3组车辙试件,根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》进行渗水系数试验。
- (3) 每个试件进行3组平行试验,取平均值。
- (4) 选取空隙率相同的马歇尔试件与车辙试件。在相同空隙率下,以自制装置所测常水头渗水系数为横坐标,标准试验所测车辙试件变水头渗水系数为纵坐标绘图(图2)。可以看出其相关性良好,拟合方程见式(1):

$$y = 1.78617x + 696.61666 (R^2 = 0.95345)$$
 (1)  
式中: $x$  为马歇尔试件常水头渗水系数; $y$  为车辙试件变水头渗水系数。

1.4 堵塞颗粒级配的确定

透水沥青路面直接暴露在空气中,在风力水力等

环境因素的影响下,会产生空隙堵塞的问题,在不同级配下引起堵塞的敏感颗粒粒径又不尽相同。不同的颗粒粒径,也会对路面的堵塞情况造成不同的影响,所以在试验前要先确定堵塞颗粒的级配组成,以达到模拟出透水沥青路面堵塞最严重的情况。

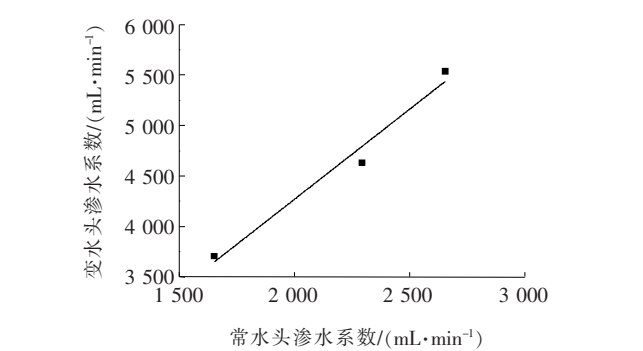


图2 两种不同测试方法所得渗水系数对应关系图

当细集料粒径大于4.75 mm时,一般不会进入混合料空隙中,而粒径小于0.075 mm时几乎不会对混合料的堵塞产生影响<sup>[21-23]</sup>。故选取0.075~4.75 mm 6档集料作为堵塞颗粒,为确保细颗粒能对混合料进行充分堵塞且不过量溢出,每档取4 g<sup>[24]</sup>,作为确定堵塞级配试验的细集料。

将未脱模的马歇尔试件放置于0.075 mm筛孔上,然后将混合好的细集料,分多次均匀撒布在马歇尔试件上。每次撒布之间用大量水冲刷,堵塞结束后用小刷子小心将试件表面的细颗粒收集起来,与筛孔上的细颗粒一起烘干后进行筛分,各档堵塞集料试验前质量与试验后收集到的颗粒质量之差即为进入试件中的细集料质量,如表1所示。

表1 堵塞颗粒的筛分结果

筛孔尺寸/mm	质量/g
2.36~4.75	0.8
1.18~2.36	3.0
0.6~1.18	3.6
0.3~0.6	3.5
0.15~0.3	3.2
0.075~0.15	2.5

1.5 击实试验参数的确定

透水沥青路面在铺筑后,直接承受车辆荷载的作用,会导致透水沥青路面高度的下降和空隙率的衰减,相当于对已经成型的马歇尔试件进行了二次击实。为此,参考车辙试验中车辙试件的加热时间,将未脱模的

马歇尔试件在 60 ℃ 条件下加热 5 h, 并使用击实仪进行 0~30 次的击实, 以 5 次为间隔, 以作为道路最不利状况的模拟。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 堵塞试验结果分析

选取空隙率分别为 19%、21%、24% 的 3 组马歇尔试件进行试验, 每组试件中分别堵塞 0、5 g、10 g、15 g、20 g、25 g、30 g 的细集料, 细集料级配见表 1。各空隙率下所得堵塞颗粒质量与渗水系数关系见图 3, 试件堵塞后渗水系数保有的百分比即保有率见图 4。

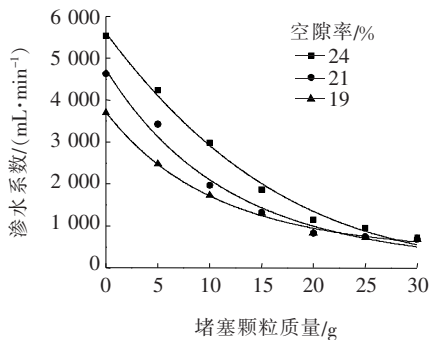


图 3 渗水系数随堵塞颗粒质量的变化关系

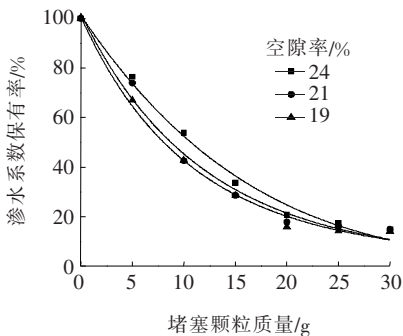


图 4 渗水系数保有率随堵塞颗粒质量的变化关系

图 3 中拟合关系曲线为:

$$y_{24\%} = e^{8.63123 - 0.05923m - 6.04551 \times 10^{-4}m^2} \quad (R^2 = 0.99073) \quad (2)$$

$$y_{21\%} = e^{8.46189 - 0.08438m + 3.17768 \times 10^{-4}m^2} \quad (R^2 = 0.97971) \quad (3)$$

$$y_{19\%} = e^{8.22011 - 0.08605m + 8.77826 \times 10^{-4}m^2} \quad (R^2 = 0.99559) \quad (4)$$

式中:  $m$  为堵塞颗粒质量;  $y$  为渗水系数。

图 4 中拟合关系曲线为:

$$y_{24\%} = e^{4.61853 - 0.06113m - 4.6808 \times 10^{-4}m^2} \quad (R^2 = 0.98785) \quad (5)$$

$$y_{21\%} = e^{4.62654 - 0.08438m + 3.1735 \times 10^{-4}m^2} \quad (R^2 = 0.97971) \quad (6)$$

$$y_{19\%} = e^{4.61438 - 0.09183m + 5.64278 \times 10^{-4}m^2} \quad (R^2 = 0.9915) \quad (7)$$

式中:  $m$  为堵塞颗粒质量;  $y$  为渗水系数保有率。

由图 3 可以看出: 在相同空隙率条件下, 堵塞颗粒质量与渗水系数之间存在较强的相关性。随着堵塞颗粒质量的增加, 不同空隙率下的透水沥青混合料的渗水系数开始下降, 下降速度呈先快后慢的趋势。初始时, 透水沥青混合料空隙较大, 细颗粒能够充分进入空隙中, 导致混合料的渗水系数下降较为明显, 随着堵塞的细颗粒质量逐渐增加, 混合料的空隙不断被填满, 空隙率仍处于衰减的状态。但混合料空隙率减小会导致后续堵塞的细颗粒, 尤其是粒径较大的颗粒难以进入空隙之中, 而这些颗粒会在混合料上方或表面空隙内处于悬浮状态, 产生的堵塞效果不明显。

### 2.2 击实试验结果分析

将未经过细集料堵塞的 3 种空隙率透水沥青混合料进行 0~30 次击实, 以 5 次为间隔, 进行渗水系数测试, 以上每组试验均进行 3 次平行试验并取平均值, 绘出渗水系数随击实次数的变化曲线, 如图 5 所示。

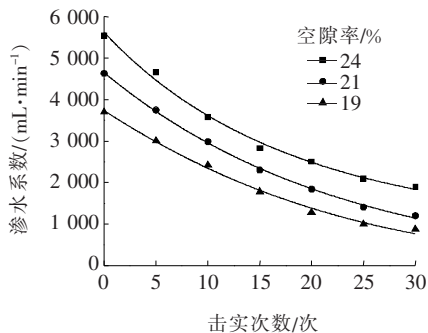


图 5 未堵塞混合料渗水系数随击实次数的变化情况

图 5 中拟合关系曲线为:

$$y_{24\%} = e^{8.63447 - 0.04768x + 3.45663 \times 10^{-4}x^2} \quad (R^2 = 0.99068) \quad (8)$$

$$y_{21\%} = e^{8.44495 - 0.04466x - 7.16236 \times 10^{-4}x^2} \quad (R^2 = 0.99842) \quad (9)$$

$$y_{19\%} = e^{8.22547 - 0.04349x - 3.11677 \times 10^{-4}x^2} \quad (R^2 = 0.99294) \quad (10)$$

从图 5 可以看出: 在相同堵塞情况下, 不同空隙率下的透水沥青混合料的渗水系数都随着击实次数的增加而不断衰减, 且衰减速度呈先快后慢的趋势。对透水沥青混合料进行击实, 导致试件高度降低, 实际上就是压密了混合料的结构, 使空隙率降低, 由此导致渗水系数的降低。当混合料空隙较大时, 结构比较容易被压缩, 在受到同等击实作用时, 空隙衰变程度更大。所以当透水沥青混合料受到多次击实后, 空隙率及渗水

系数的变化相对较小。

统计3种空隙率的透水沥青混合料在不同堵塞物质量情况下随击实次数的增加,所得渗水系数变化规律如图6所示。

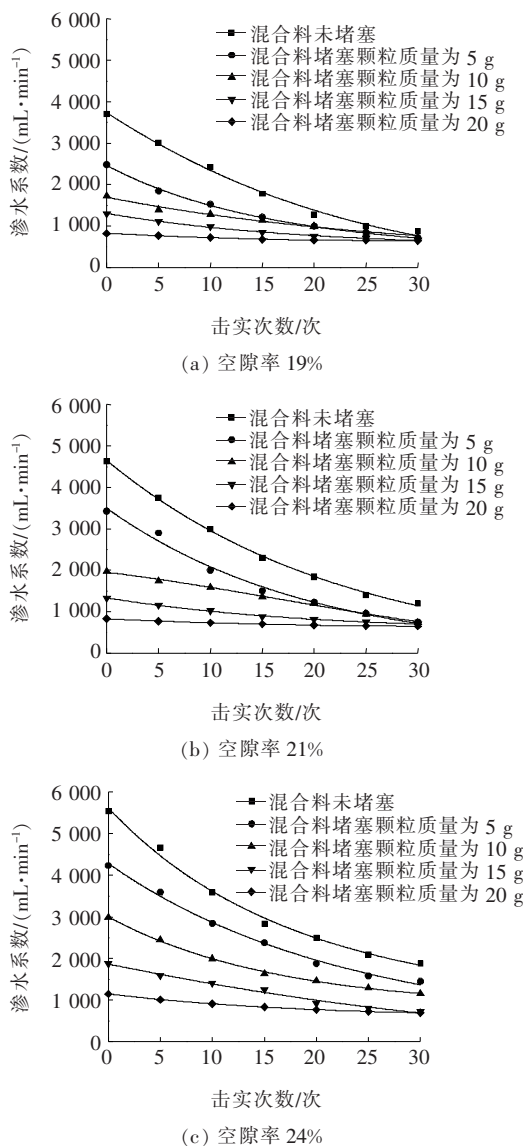


图6 不同空隙率的透水沥青混合料不同堵塞程度下  
渗水系数随击实次数的变化

从图6可以看出:相同堵塞物质量情况下,空隙率为19%的透水沥青混合料渗水系数下降最少,即渗水系数衰变速度最慢;空隙率为24%的透水沥青混合料渗水系数下降最多,即渗水系数衰变速度最快;而在相同空隙率情况下,堵塞程度越小的透水沥青混合料击实后渗水系数下降的速度越快。综合以上分析,无论是因堵塞或是击实导致的混合料空隙率的减小都会直接导致渗水系数的下降,而空隙率越小时就越难以被压缩,与上文中的分析相符。

### 3 透水沥青混合料渗水系数衰变模型的建立

透水沥青路面作为道路的表面结构,直接暴露在外界复杂的自然环境中,受多种条件共同作用。空气中的灰尘颗粒在风力带动下进入路面空隙中,在车辆荷载等作用下又进行了压实,其中细集料进入空隙引起堵塞后,又会在水力的作用下向边缘处扩散。

透水沥青路面渗水系数降低的主要因素,即为细颗粒的堵塞作用与压实引起的空隙率下降。而在雨天情况下,由于水力的带动作用,会带走一部分堵塞在透水沥青路面内部的细颗粒,从而使路面的渗水系数部分恢复。基于以上情况,将一段时间的降雨冲刷,看作一次累积的颗粒流动变化,由此建立透水沥青混合料渗水系数衰变模型。

透水沥青路面存在路拱横坡,在水力作用下,堵塞颗粒会随着水流向边缘扩散,导致局部堵塞颗粒不均。

根据流体动力学的基本概念,流体运动由无数质点流体所组成,质点本身的运动存在一定的规律性,找到其原因,就可以解决运动中的问题。液流中同一瞬间许多质点组成的曲线为流线,任一点的切线方向即为运动方向,即该模型中路面自中线至边缘方向。同时,该模型建立的基准为将雨水视为不可压缩流体,体变形率为0,如式(11)所示:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

由于风力的带动,透水沥青路面空隙内贮存了一定量的粉尘,设单侧路面宽度为 $L$ ,其均匀分布在路面中,总质量为 $M$ ,其密度为 $\omega = M/L$ 。由于透水沥青路面路拱横坡坡度较小,堵塞颗粒在水流作用下穿行速度可视为匀速 $v$ ,向边缘流动的比例为 $a$ ,流动时粉尘穿过路面的通过率为 $\lambda$ ,颗粒流动距路中线距离为 $x$ ,颗粒瞬时流量为 $q(x, t)$ ,流经总量 $Q$ 为:

$$Q = \int_0^T q(L, t) dt \quad (12)$$

当 $t=0$ 时,记 $q(x, 0) = q(x)$ ,则考察 $(x, x + \Delta x)$ 一段,粉尘颗粒通过 $x$ 和 $x + \Delta x$ 处的流量分别为 $q(x)$ 和 $q(x, x + \Delta x)$ 。

设:

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta x}{v} \quad (13)$$

式中: $\Delta \epsilon$ 为穿过 $\Delta x$ 所需时间,令 $\Delta \epsilon \rightarrow 0$ 得:



$$\frac{dq}{dx} = -\frac{\lambda}{v}q(x) \quad (14)$$

则由守恒定律可知:

$$q(x) - q(x + \Delta x) = \lambda q(x) \Delta \varepsilon \quad (15)$$

在  $x=0$  处堵塞颗粒质量为  $H_0$ , 则根据初始条件得:  $q(0) = aH_0, H_0 = v\omega_0$

$$\text{求解: } \frac{dq}{dx} = -\frac{\lambda}{v}q(x) \quad q(0) = aH_0$$

解得瞬时流量:

$$q(x) = aH_0 e^{-\frac{\lambda x}{v}} \quad (16)$$

单位时间内通过边缘处, 即  $x=L$  处的堵塞颗粒质量为  $q(L, t)$ , 记  $t$  时刻堵塞物量为  $H(t)$ , 则:  $H(t) = v\omega(vt, t)$ , 且  $q(vt, t) = aH(t)$ 。

经分析可得:

$$\frac{dq}{dx} = -\frac{\lambda}{v}q(x, t) \quad (17)$$

$$q(x, t) = aH(t) e^{-\frac{\lambda(x-vt)}{v}} \quad (18)$$

当  $x=L$  时,

$$q(x, t) = av\omega(vt, t) e^{-\frac{\lambda(L-vt)}{v}} \quad (19)$$

由于透水沥青混合料空隙内的粉尘颗粒不断向边缘处流动, 所以粉尘颗粒密度不断变化, 考察  $\Delta t$  时间内密度的增量, 根据假设知:

$$\omega(x, t + \Delta t) - \omega(x, t) = \lambda \frac{q(x, t)}{v} \Delta t \quad (20)$$

令  $\Delta t \rightarrow 0$ , 并将式(16)、(17)代入得:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\lambda}{v} av\omega(vt, t) e^{-\frac{\lambda(L-vt)}{v}} \quad (21)$$

对上式积分得:

$$\omega(x, t) = \omega_0 + \lambda a e^{-\frac{\lambda x}{v}} \int_0^L \omega(ut, t) e^{\lambda t} dt \quad (22)$$

将  $x=vt$  代入并两端乘以  $e^{\lambda t}$ , 得:

$$\omega(vt, t) e^{\lambda t} = \omega_0 e^{\lambda t} + \lambda a \int_0^L \omega(vt, t) e^{\lambda t} dt$$

记  $\omega(vt, t) e^{\lambda t} = f(t)$ , 则上式为:

$$f(t) = \omega_0 e^{\lambda t} + \lambda a \int_0^L f(t) dt \quad (23)$$

对  $t$  求导并注意在  $t=0$  时,  $f(0) = \omega_0$ , 得到关于  $f(t)$  的微分方程:

$$f'(t) - \lambda a f(t) = \lambda \omega_0 e^{\lambda t} \quad (24)$$

解为:

$$f(t) = \frac{\omega_0}{1-a} e^{\lambda t} [1 - a e^{-(1-a)\lambda t}] \quad (25)$$

将  $f(t)$  代回原来的  $\omega(vt, t)$ , 则:

$$\omega(vt, t) = \frac{\omega_0}{1-a} [1 - a e^{(a-1)\lambda t}] \quad (26)$$

将式(26)代入式(19)得:

$$q(L, t) = \frac{av\omega_0^2}{1-a} e^{\frac{\lambda(L-vt)}{v}} - \frac{a^2 v\omega_0^2}{1-a} e^{\frac{\lambda(av-2\lambda t+L)}{v}} \quad (27)$$

将式(27)代入式(12), 积分得:

$$Q = \frac{av\omega_0^2}{\lambda(1-a)} e^{\frac{\lambda L}{v}} (1 - e^{-\frac{\lambda^2 T}{v}}) - \left\{ [e^{(\frac{\lambda av-2\lambda}{v})^2 T} - 1] \cdot \frac{v}{\lambda av - 2\lambda^2} e^{\frac{\lambda L}{v}} \right\} \frac{a^2 v\omega_0^2}{1-a} \quad (28)$$

因为  $\omega_0$  随时间匀速增大, 所以将  $\omega_0$  看作时间的函数, 即  $\omega_0 = \beta t$ , 有:

$$Q = \frac{av\beta^2 t^2}{\lambda(1-a)} e^{\frac{\lambda L}{v}} (1 - e^{-\frac{\lambda^2 T}{v}}) - \left\{ [e^{(\frac{\lambda av-2\lambda}{v})^2 T} - 1] \cdot \frac{v}{\lambda av - 2\lambda^2} e^{\frac{\lambda L}{v}} \right\} \frac{a^2 v\beta^2 t^2}{1-a} = Q(t) \quad (29)$$

因为堵塞颗粒质量  $m$  随时间增加, 故可以看作  $t$  的函数, 即:

$$m = ct$$

式中:  $c$  为常数。

将堵塞颗粒质量与时间的关系看作正比例函数, 而击实次数也随时间的增长而增加, 且设试件堵塞细颗粒每增加 1 g, 击实次数增加  $\theta$ , 所以击实次数与时间的关系为:

$$x = \theta ct$$

试验室所采用的马歇尔试件其直径约为 101.6 mm, 所以模型中的单位面积约为马歇尔试件的 30.852L 倍, 由于水力带动导致的颗粒减少进而渗水系数增大量为:

$$m_1 = m - \frac{Q(t)}{30.852L} = ct - \frac{Q(t)}{30.852L} \quad (30)$$

$$y_{24\%} = e^{8.63123-0.05923m_1-6.04551 \times 10^{-4} m_1^2 - e^{8.63123-0.05923ct-6.04551 \times 10^{-4} c^2 t^2}} \quad (31)$$

$$y_{21\%} = e^{8.46189-0.08438m_1+3.17768 \times 10^{-4} m_1^2 - e^{8.46189-0.08438ct+3.17768 \times 10^{-4} c^2 t^2}} \quad (32)$$

$$y_{19\%} = e^{8.22011-0.08605m_1+8.77826 \times 10^{-4} m_1^2 - e^{8.22011-0.08605ct+8.77826 \times 10^{-4} c^2 t^2}} \quad (33)$$

透水沥青混合料空隙堵塞以及击实所导致的渗水系数变为:

$$y_{24\%} = 0.01 e^{13.253-0.06113ct-0.04768\theta t-4.6808 \times 10^{-4} ct+3.45663 \times 10^{-4} \theta t} \quad (34)$$

$$y_{21\%} = 0.01 e^{13.07149-0.08438ct-0.04466\theta t+3.1735 \times 10^{-4} ct-7.16236 \times 10^{-5} \theta t} \quad (35)$$

$$y_{19\%} = 0.01e^{12.83985 - 0.09183ct - 0.04349\theta t + 5.64278 \times 10^{-4}ct - 3.11677 \times 10^{-4}\theta t} \quad (36)$$

透水沥青混合料初始渗水系数经由颗粒的堵塞和车辆的压实后,进行了一定程度的衰减。在雨天又由

于雨水的冲刷作用,透水沥青混合料的渗水系数又会发生一部分的恢复。

综上,透水沥青混合料空隙衰变导致的渗水系数下降模型为:

$$C_{\omega 24\%} = e^{8.63123 - 0.05923m_1 - 6.04551 \times 10^{-4}m_1^2} - e^{8.63123 - 0.05923ct - 6.04551 \times 10^{-4}c^2t^2} + 0.01e^{13.253 - 0.06113ct - 0.04768\theta t - 4.6808 \times 10^{-4}ct + 3.45663 \times 10^{-4}\theta t} \quad (37)$$

$$C_{\omega 21\%} = e^{8.46189 - 0.08438m_1 + 3.17768 \times 10^{-4}m_1^2} - e^{8.46189 - 0.08438ct + 3.17768 \times 10^{-4}c^2t^2} + 0.01e^{13.07149 - 0.08438ct - 0.4466\theta t + 3.1735 \times 10^{-4}ct - 7.16236 \times 10^{-5}\theta t} \quad (38)$$

$$C_{\omega 19\%} = e^{8.22011 - 0.08605m_1 + 8.77826 \times 10^{-4}m_1^2} - e^{8.22011 - 0.08605ct + 8.77826 \times 10^{-4}c^2t^2} + 0.01e^{12.83985 - 0.09183ct - 0.04349\theta t + 5.64278 \times 10^{-4}ct - 3.11677 \times 10^{-4}\theta t} \quad (39)$$

## 4 结论

(1) 无论是因堵塞或是击实导致的混合料空隙率的减小都会直接导致渗水系数的下降,而空隙率越小时就越难以被压缩,渗水系数下降速度越慢。

(2) 建立的透水沥青路面渗水系数衰变模型,可以用于预测随时间变化导致的堵塞、行车与降雨所引起的透水沥青路面渗水系数的变化情况。

(3) 在实际使用过程中,透水沥青路面渗水系数的衰变速度与初始空隙率、使用时间、粉尘颗粒累计速度、过滤系数、压实次数具有直接关系。将不同透水沥青混合料参数代入该模型中,即可推导出渗水系数。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Mingjiang, GUO Chao, YU Baoyang, et al. CTCP Temperature Fields and Stresses[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2017, 10(6): 553-562.
- [2] DONG Y M, TAN Y Q, LIU H, et al. Noise Performance of Drainage Asphalt Pavement[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2009, 2(6): 280-283.
- [3] BERENGIER M, HAMET J F, BAR P. Acoustical Properties of Porous Asphalts: Theoretical and Environmental Aspects[J]. Transportation Research Record, 1990, 1265: 9-24.
- [4] 吴立报, 郑晓光, 陈亚杰. 透水沥青路面渗水功能衰变特性研究[J]. 中国市政工程, 2018, 201(6): 63-66, 111.
- [5] ROBERT M R, THOMAS P B, JAMES J H, et al. Water Quality and Hydrologic Performance of a Porous Asphalt as a Storm-Water Treatment Strategy in a Cold Climate [J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(1):

- 81-89.
- [6] RUNRUANGVIROJN P, KANTTPONG 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.
- [7] GRUBER I, ZINOVNIK 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.
- [8] 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.
- [9] 周韡, 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.
- [10] 王文奇, 罗忠贤, 朱开成, 等. 基于格子 Boltzmann 法的透水沥青路面材料水渗流模拟[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 1-7.
- [11] 易军艳. 基于渗水特性的沥青混合料空隙率标准[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 17-20.
- [12] TAN S A, FWA T F. Gumechanism of Porous Asphalt Mixes[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2000, 28(3): 207-216.
- [13] GONZÁLEZ-ANGULLO N, CASTRO D, RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ J, et al. Runoff Infiltration to Permeable Paving in Clogged Conditionals[J]. Urban Water Journal, 2008, 5(2): 117-124.
- [14] KUANG Xuheng, KIM Jongyeep, GNECCO Ilaria, et al. Particle Separation and Hydrologic Control by Cementitious Permeable Pavement[J]. Transportation Research Record, 2007, 2025(1): 111-117.
- [15] NEVILLE A M. Properties of Concrete[M]. Addison Wesley Longman Limited, Essex, England, 1996.