

# 基于排水沥青路面结构参数的排水能力研究

张从友, 何兆益, 王东敏, 黄佳兴

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074)

**摘要:** 为提高在特定降雨气候地区排水沥青路面设计可靠性,以公称最大粒径为 13.2 mm 的排水沥青混合料(PAC-13)为研究对象,基于自主研发的极限排水强度测试仪,利用均匀试验设计方法和大型多功能数据分析软件系统 DPS(Data Processing System)进行试验和数据分析,建立极限排水强度与排水层厚度、路拱横坡及空隙率的回归模型,提出以极限排水强度作为排水沥青路面排水能力的新评价指标。研究结果表明:① 自主研发的极限排水强度测试仪对室内成型的车辙板试件试验测试可以获得理想效果;② 极限排水强度与排水层厚度和路拱横坡呈线性相关关系,且路拱横坡的影响系数约等于排水层厚度影响系数的 3 倍,与空隙率的平方呈线性相关关系。

**关键词:** 排水沥青路面; 极限排水强度; 均匀试验设计; 排水能力

随着高速公路路网规划日趋完善,为适应交通发展,半刚性路面结构占据沥青路面的主导地位,人民群众对出行质量要求不断升级,交通建设愈加突显“环境友好”的理念,如何向社会提供高安全、更舒适、更环保的道路表面特性是新时期交通部门追求的新目标。行

车速度和路表水膜是影响行车安全的重要因素,研究表明:行车速度越大或水膜厚度越大,摩阻力越小,当行车速度或水膜厚度达到一定水平,水膜的垂直升力会逐渐抬起轮胎,直至轮胎与路面直接接触面积为零,出现行车滑水现象,从而导致安全事故。综上所述,降

为接近,无明显差异。由于渠化交通荷载的作用,使得沥青路面动态模量降低。

(2) 由低温半圆弯拉试验和常温劈裂试验发现,应急车道处芯样抗拉强度最大,超车道轮迹带处次之,行车道轮迹带处最小,但是三者之间差异相对并不显著。在路面渠化交通荷载的作用下,沥青混合料的抗拉能力有所降低,低温抗裂性能发生衰减。

(3) 通过间接拉伸疲劳试验发现,应急车道处沥青混合料试件的疲劳寿命最大,超车道轮迹带处次之,行车道轮迹带处最小,且在下面层试件疲劳寿命的差异相对更加明显。渠化交通荷载作用使得沥青混合料疲劳性能有所降低,而且荷载大小对沥青混合料疲劳寿命影响显著,为保证路面的长期使用性能,应严格控制超载车辆在路面上的行驶行为。

## 参考文献:

[1] 杨福祺. 沥青路面在渠化交通中的车辙问题[J]. 黑龙江交通科技, 2006(11).

- [2] 魏建国, 秦志斌, 查旭东, 等. 京珠高速公路渠化交通及路况调查统计分析[J]. 中外公路, 2006(3).
- [3] 申俊敏. 汾阳至离石高速公路沥青路面车辙病害调查及技术处治[J]. 科学之友(B版), 2008(2).
- [4] 钱霞, 张久鹏, 黄晓明, 等. 沥青混凝土路面车辙病害调查及机理分析[J]. 交通标准化, 2007(1).
- [5] 关长禄, 吕得保, 孙秀东, 等. 行车道设计宽度对沥青混凝土路面病害的影响及改进措施的探讨[J]. 公路, 2010(5).
- [6] 王志. 基于交通荷载横向重分布的沥青路面预防性养护新技术研究[D]. 长安大学博士学位论文, 2012.
- [7] 陈辉, 刘涵奇, 罗蓉, 等. 利用动态模量主曲线研究沥青混合料水稳定性[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017(3).
- [8] Saha G, Biligiri K P. Fracture Properties of Asphalt Mixtures Using Semi-Circular Bending Test: A State-of-the-Art Review and Future Research[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 103-112.
- [9] 吕松涛, 李亦鹏, 刘超超, 等. 基于劈裂试验的沥青混合料拉压模量同步测试方法[J]. 中国公路学报, 2017(10).
- [10] 黎晓, 梁乃兴. 间接拉伸试验条件下沥青混合料的疲劳行为[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013(6).

收稿日期: 2019-02-12

作者简介: 张从友, 男, 硕士研究生, E-mail: 960971743@qq.com

雨环境下,及时排出路表雨水是亟待解决的问题,排水沥青路面是骨架—空隙结构,具有排水、抗滑、降噪、吸收尾气等优良性能,优良的排水特性源于排水表层具有大量连通空隙,路表雨水在重力和毛细力作用下渗透至防水黏结层以上的排水表层内部,再沿着综合坡度方向在内部连通空隙中横向渗透至路侧边缘附属排水设施。排水是一个三维空间流动过程,在排水过程中,影响排水能力的并非某单一因素,而是多种因素综合作用。目前,国内外对排水能力的研究主要集中在某单一因素影响下的变化规律。常用竖向渗透系数和横向渗透系数评价排水表层的排水性能,相关研究表明:目前并没有规范统一测量大空隙结构排水能力的装置。

基于室内试验,以公称最大粒径 13.2 mm 的排水沥青混合料(PAC-13)为研究对象,自主研发极限排水强度测试仪。基于自主研发的极限排水强度测试仪,利用均匀试验设计方法和大型多功能数据分析软件系统 DPS(Data Processing System)进行试验设计和试验数据分析,建立极限排水强度与排水层厚度、路拱横坡及空隙率的三元非线性回归模型,提出以极限排水强度作为排水沥青路面排水能力的新评价指标。

## 1 极限排水强度测试仪研发

目前国内外排水沥青路面排水能力测试是成型不同试件分别测试其竖向和横向渗透系数,雨水在排水层的渗流是三维连续的过程,分别研究不能很好地表征排水能力的大小。因此,该文以极限排水强度代替渗透系数表征排水沥青路面排水能力,模拟实际路面边界条件,结合实际降雨渗流路径,自主研发极限排水强度测试仪,如图 1、2 所示。

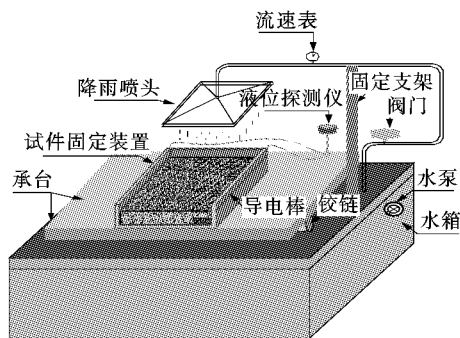


图 1 模拟实际降雨极限排水强度测试仪

### 1.1 极限排水强度测试仪结构组成及功能

(1) 水箱:提供试验所需用水,相当于实际降雨气

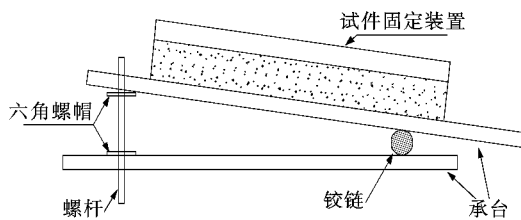


图 2 承台与试件固定装置连接侧立面图

候条件下的外界降雨。

(2) 水泵:提供试验水压,稳定供水压力,便于试验正常进行。

(3) 阀门:控制进水流速度,模拟降雨强度。

(4) 流速表:根据降雨强度换算成水流速度,通过阀门控制流速,流速表实时读取当前流速,反映该流速下的降雨强度。当路面出现表面径流时的临界水流速度定义为极限排水强度。

(5) 喷头:小范围内,单位面积可视雨水均匀降落到地面上,喷头将进水管的水均匀分散,模拟实际降雨特征。

(6) 试件固定装置:模拟实际排水沥青路面边界条件。底部尺寸略大于标准车辙板底面尺寸,便于试件的安装;三侧板高度为 70 mm,大于标准车辙板试件高度,防止水从表面溢出;一边开口,模拟实际路面与外界排水设施接触面;侧板与底板连接密封牢固,不出现松脱和漏水现象。

(7) 液位探测仪及导电棒:导电棒安装在左右两侧板上,安装位置与车辙板顶边紧密接触并保持齐平,并用导线与液位探测仪连接,用于控制车辙板出现表面径流的临界状态。

(8) 承台:上部承台用于安装车辙板固定装置;下部承台用作水箱盖,固定在水箱顶部,并保持水平。

(9) 六角螺栓、铰链:螺栓和铰链连接上下承台,铰链置于前部,固定在下承台上,上承台置于上方,可以竖直上下活动;螺栓置于后端,上下分别连接上下承台,可以通过调节螺栓来调节上承台后端的高度。两者共同作用,可以调节上部承台与下部承台的角度,模拟实际路面的路拱横坡。

### 1.2 试验方法与步骤

(1) 按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料试件制作方法(轮碾法)成型车辙板试件,待试件冷却后脱模。

(2) 脱模后的车辙板试件进行表面清理,用密封性材料(如石蜡)涂抹在底面、背面以及左侧面和右侧面,进行密封性处理,保证不透水,留顶面和一个正面

作为渗水面,模拟实际路面的边界条件。

(3) 将处理好的试件安装在试件固定装置内,并对试件与固定装置侧板间的缝隙进行密封性处理,保证不透水,试件密封示意图如图 3 所示,其中阴影部分表示未密封的渗水面。

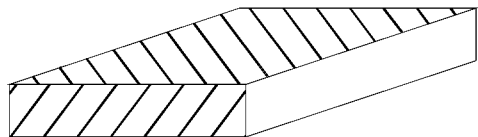


图 3 车辙板试件密封示意图

(4) 依次打开阀门和水泵,通过调节阀门控制流速,至雨水充分填充试件各空隙为止,调节阀门,至试件上水位刚好稳定在路面出现表面径流的临界状态,即液位检测仪开始正常工作的临界状态,保持水流稳定,读取流速表的读数,即极限排水强度  $q_{\max}$  (mL/min),多次试验,记录数据并处理,完成试验。

2 试验设计与数据获取

以室内试验、试验设计方法、理论分析以及模型回归分析为手段,以数值分析方法和概率论数据处理为基础,建立路面结构参数与极限排水能力的回归模型。

排水沥青路面设计时,不但要考虑路面的排水能力,还要从路线设计考虑路拱横坡,从路面结构设计考虑路面的厚度,需要同时满足结构的强度和耐久性、行车的安全性和路面的排水性。大量研究表明,路面厚度与道路等级有关,排水沥青路面的排水表层是路面面层的上面层结构,为了达到良好的排水效果,该文将排水层厚度设计为 40~60 mm;位于中等降雨强度地区,路拱横坡通常采用 2%,随着降雨强度的增大,路拱横坡宜适当增大,高速公路、一级公路和车道数较多的公路宜设置双向路拱坡度,超高过渡段,路拱坡度宜适当增大,且按照不同的路面类型,路拱横坡的取值也有差异,随着路面等级的增加,路拱横坡减小,即碎石等粒料路面横坡一般为 2.5%~3.5%,次高级路面一般为 1.5%~2.5%,高级路面一般为 1%~2%,因此该文将路拱横坡设定为 0~4%;排水沥青路面的排水能力与路面空隙率有密不可分的关联,排水沥青路面定义为压实后空隙率为 18%~25%,能够在混合料内部形成排水通道的沥青路面类型,以定义的空隙率为基准线,该文将空隙率设计为 19%~23%。均匀试验设计方法规定试验水平一般不小于 4 次,将排水层厚度、路拱横坡和空隙率的设计范围,按照等差数列和均

匀分散分析,该文将试验水平数设置为 5 次,满足大于 4 次的规定。即该文均匀试验设计方法为三因素五水平  $U_5(5^3)$  均匀设计,影响因素初步设计方案及因素水平表如表 1、2 所示。

表 1 影响因素初步设计方案

项目	排水层厚度 ( $X_1$ )/mm	路拱横坡 ( $X_2$ )/%	空隙率 ( $X_3$ )/%
设计范围	40~60	0~4	19~23
公差 $d$	5	1	1

注:水平数为 5。

表 2 均匀试验设计因素水平表

水平	排水层厚 $h$ /mm	路拱横坡 $i_h$ /%	空隙率 VV/%
1	40	0	19
2	45	1	20
3	50	2	21
4	55	3	22
5	60	4	23

采用 DPS(Data Processing System)大型多功能数据分析软件系统构建均匀设计表,DPS 数据处理软件是中国具有自主知识产权的一款具有统计分析功能和试验方案设计的软件,包含各种统计方法,有强大的数据处理功能,对于均匀试验设计试验结果分析操作简单。利用 DPS 构建三因素五水平的均匀设计表  $U_5(5^3)$ ,设定优化次数为 1 000 次,寻优时间为 5 min,得到初选均匀设计表,再对初选均匀设计表进一步优化。衡量均匀设计优化方案由 8 个指标组成,分别是中心化偏差  $CD$ 、L2—偏差  $D$ 、修正偏差  $MD$ 、对称化偏差  $SD$ 、可卷偏差  $WD$ 、条件数  $C$ 、D—优良性、A—优良性,前 5 个为均匀试验设计表的均匀性度量指标,其余 3 个为均匀试验设计表作为试验设计矩阵的信息矩阵优良性指标,衡量均匀设计方案的方法是各个指标数值越小,试验方案越好,在具体试验中,需根据试验要求对各个指标综合性考虑,选择最优的试验方案。此次试验选择以中心化偏差  $CD$  为指标进行优化,优选出的三因素五水平  $U_5(5^3)$  均匀试验设计方案和优化方案指标如表 3、4 所示。

该方案由 3 个不同因素组成,且每个因素之间相互独立,每个因素由 5 个试验水平构成,满足均匀试验的“均匀分散”特点。由表 3 可得:目标均匀试验设计方案如表 5 所示。

表 3 三因素五水平  $U_5(5^3)$  均匀设计表

水平	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	2	5	4
2	3	3	5
3	4	4	1
4	5	1	3
5	1	2	2

表 4 衡量均匀试验设计优化方案指标

优化方案指标	表示符号	优化值
中心化偏差	CD	0.178 0
L2-偏差	D	0.074 2
修正偏差	MD	0.179 9
对称化偏差	SD	0.611 7
可卷偏差	WD	0.220 2
条件数	C	2.034 3
D-优良性		0.001 2
A-优良性		0.307 1

表 5 目标均匀试验设计方案

水平	排水层厚 $h/\text{mm}$	路拱横坡 $i_h/\%$	空隙率 $VV/\%$	备注
1	45	4	22	试验 1
2	50	2	23	试验 2
3	55	3	19	试验 3
4	60	0	21	试验 4
5	40	1	20	试验 5

室内试验成型试件中,不能保证所成型的试件与目标试件尺寸和结构完全一样,该试验能够固定的因素是每次试验的路拱横坡,而排水层厚度和空隙率在试件成型时会与目标值存在差异,设定每组试验进行 4 次有效平行试验取平均值,求得实际的均匀试验设计方案和各因素的均匀分散性如表 6 所示。

表 6 均匀试验设计方案

水平	排水层厚 $h/\text{mm}$	路拱横坡 $i_h/\%$	空隙率 $VV/\%$	备注	极限排水强度 检测值 $q_{\max}/$ ( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )
1	45.2	4	22.1	试验 1	636.9
2	50.1	2	23.2	试验 2	694.1
3	54.9	3	18.9	试验 3	482.3
4	59.8	0	20.8	试验 4	486.6
5	40.0	1	20.3	试验 5	246.4

由表 6 可知:需要进行 5 组试验。利用自主研发的极限排水强度测试仪进行试验,每组试验进行 4 次有效平行试验取平均值,得到的极限排水强度检测值亦示于表 6 中。

3 极限排水能力模型建立

建立均匀试验设计,需要根据试验所得数据建立回归模型,回归模型建立的前提是需要确定回归类型和回归模型预测。该文假定因素与响应之间预测回归模型为多元非线性回归模型,多元非线性表达式为:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{k_1 k_2 \dots k_n} a_{k_1 k_2 \dots k_n} x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n} \tag{1}$$

式中: $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为多元非线性回归模型的影响因素; $a_{k_1 k_2 \dots k_n}$ 为各因素的回归系数; $f$ 为各因素影响下的响应结果。

由于厚度、坡度和空隙率之间各自独立,不相互关联、相互影响,不产生交互作用,因此建立排水沥青路面极限排水强度模型为可加模型,回归模型中不存在交互项,即不存在 $X_i X_j \dots X_k (i \neq j \neq \dots \neq k)$ 项。大量研究表明:排水层厚度和路拱横坡与极限排水强度存在线性相关关系,空隙率与极限排水强度为二次非线性关系,因此该文利用二次多项式模型进行拟合,其预测模型为:

$$q_{\max} = \mu + \alpha_1 h^2 + \alpha_2 i_h^2 + \alpha_3 VV^2 + \beta_1 h + \beta_2 i_h + \beta_3 VV + \varepsilon \tag{2}$$

式中: $\mu, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为回归系数; $\varepsilon$ 为随机误差,假定 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 。

该文采用 DPS 对模型进行多因子及平方项逐步回归,求解回归系数和随机误差。经优化计算,建立极限排水强度回归模型如式(3)所示:

$$q_{\max} = 18.037\ 0h + 54.037\ 2\ i_h + 2.158\ 0\ VV^2 - 1\ 466.083\ 3(R^2=0.946\ 4) \tag{3}$$

由回归模型可以看出:排水层厚度、路拱横坡与极限排水强度呈线性关系,空隙率与极限排水强度呈二次非线性关系。若不考虑混合料路用性能,增加混合料空隙率是增大路面排水能力最有效的方法,但在路面结构和道路线形设计时,需综合考虑混合料的路用性能、线形设计要求以及驾驶舒适性,因此为满足某一地区降雨强度要求,进行排水沥青路面设计时,需综合考虑排水沥青路面的排水层厚度、路拱横坡以及排水沥青混合料空隙率等因素。

## 4 提出排水能力新评价指标

排水沥青路面常用的排水能力评价指标为渗透系数,该文基于自主研发能够模拟实际降雨强度、实际降雨小范围均匀分布、实际降雨渗流路径等测试排水沥青路面能承受的极限排水强度试验仪,从宏观角度提出新的表征排水沥青路面排水能力评价指标,即极限排水能力 $q_{\max}$ 。

试验研究表明:新的评价指标与路面的排水能力具有良好的相关性,能够代替渗透系数表征排水沥青路面的排水能力。首先,由于雨水在路面结构空隙间的流动是无规则流动,渗透系数测量的前提是假定雨水在空隙间的流动为层流,违背了雨水实际流动性质,因此渗透系数的测量存在一定的误差和局限性,而极限排水强度的测量是雨水在路面内部空隙结构流动趋于稳定后的测量结果,与雨水渗流路径和流动性质无关,因此极限排水强度更符合实际情况,更具有表征排水能力的特征,能更加直观地表征气候降雨强度;其次,渗透系数测量是通过成型马歇尔试件和车辙板试件分别测量竖向渗透系数和横向渗透系数,路面雨水渗透路径是三维空间路径,竖向渗流和横向渗流密不可分,共同作用形成完整的排水路径,渗透系数不能完整地表征其综合排水能力,而该文自主研发的测试仪模拟了小范围路面降雨的实际排水状态,因此极限排水强度更具有代表性;最后,渗透系数公式计算原理是达西定理,为获得渗透系数,需要测量排水路径长度、水头差等,其测量较为繁琐,稳定性差,测试值波动范围较大,而极限排水强度的测量较为简单,更具有统一性和普适性。

## 5 结论

(1) 极限排水强度测试结果与室内成型的排水沥青混合料试件排水性能有良好的相关关系,对试件极限排水强度测试可获得理想效果,可以很好地表征排水沥青路面的排水能力。

(2) 建立了极限排水强度与排水层厚度、路拱横坡和空隙率的多元非线性回归模型。研究表明:三因素与极限排水强度均呈现出正相关关系,即排水层厚度越大、路拱横坡越大、空隙率越大,极限排水强度越大。

(3) 极限排水强度与排水层厚度和路拱横坡呈线性相关关系,且路拱横坡的影响系数约等于排水层厚度影响系数的3倍,与空隙率的平方呈线性相关关系。

(4) 用极限排水强度代替渗透系数作为排水沥青路面排水能力评价指标,模拟雨水在排水层内部空隙间无规则流动的特征和渗流的三维特征;极限排水强度与降雨强度指标密切相关,直观地表征气候降雨强度;极限排水强度的测试,减少了排水路径长度和水头差的测量,测试结果稳定。

### 参考文献:

- [1] 沙庆林.高等级公路半刚性基层沥青路面[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 季天剑,黄晓明,刘清泉,等.沥青路面表面水膜厚度试验[J].公路交通科技,2004(12).
- [3] Tan SA, Fwa T F, Chai K C. Drainage Considerations for Porous Asphalt Surface Course Design[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2004, 1 868(1): 142—149.
- [4] 方开泰,马长兴.正交与均匀试验设计[M].北京:科学出版社,2001.
- [5] 唐启义,洪明光.DPS数据处理系统[M].北京:科学出版社,2007.
- [6] 徐皓,倪富健,刘清泉,等.排水性沥青混合料渗透系数测试研究[J].中国公路学报,2004(3).
- [7] 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(6).
- [8] 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].东南大学硕士学位论文,2004.
- [9] 李秀昌,韩曦英,孙健.利用DPS数据处理系统进行均匀试验设计与分析[J].中国卫生统计,2010(2).
- [10] 程林松.高等渗流力学[M].北京:石油工业出版社,2011.