

空隙率对透水沥青混合料路用性能的影响

曾哲^{1,2}, 刘星³, 罗蓉^{1,2}, 刘帅³, 杨洋^{1,2}(1.武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2.湖北省公路工程技术研究中心;
3.中交第二公路勘察设计研究院有限公司)

摘要: 为了探究不同空隙率条件下透水沥青混合料渗透性能及力学性能的变化情况,通过初选调试和试验验证确定不同目标空隙率的级配曲线,并成型空隙率分别为18%、20%和22%的试件,然后进行各项路用性能试验。结果表明:3种空隙率的PAC-13试件均能满足渗透性能的规范要求,抗析漏性能和抗飞散性能则分别随油石比和空隙率的增加而逐渐减弱,混合料的高温稳定性在目标空隙率为20%时相对较好,此时动稳定度最大;水稳定性和空隙率则呈现负相关关系,当空隙率为22%时,冻融劈裂强度比存在不满足规范要求的情况;通过动态模量试验并绘制主曲线发现,3条主曲线的增幅和走势类似,同一缩减频率时,空隙率为22%的混合料强度相对较低。

关键词: 透水路面板; 沥青混合料; 空隙率; 渗透性能; 力学性能

目前,中国大多数城市道路采用的都是对生态环境具有负面影响的密级配混凝土和石板材料铺装结构。由于其密封导致的低渗透性和低降噪能力,城市热岛效应和噪声污染日益严重。为了实现城市建设可持续发展的目标,透水沥青路面建设成为“海绵城市”的热点和新趋势。

透水沥青混凝土(Permeable Asphalt Concrete, 简称PAC)需要将液态水引入结构内部以达到渗透目的,同时又必须保证自身在液态水和车辆荷载作用下的强度和耐久性,它的空隙率越大,渗透性能会更强,但是力学性能可能会随之减弱,因此混合料必须同时具备优良的渗透性能和力学性能。而CJJ/T 190—

2012《透水沥青路面技术规程》规定透水沥青混合料空隙率范围为18%~25%,其范围较大,实际工程中即便混合料空隙率符合规范要求,其性能的差异性也可能较为明显。另外,目前中国规范对透水沥青混合料技术指标的规定不统一,多本规范都对透水沥青混合料的性能指标作出了规定,但是指标数量和规定值大小均互不相同,依据不同规范标准时,混合料满足性能要求的难度不同。因此,该文针对不同空隙率的PAC-13试件进行渗透性能、抗析漏和飞散性能、高温稳定性、水稳定性、抗滑性能和动态模量的测试与研究,并与规范值进行比较分析,以探究空隙率不同时混合料性能的变化情况。

路,2007(11)。

- [2] 李大鹏,伍育钧,倪富健,等.超薄沥青混凝土配合比设计及性能研究[C].2006 ISSA 全球大会暨国际沥青路面维修养护技术研讨会,2006.
- [3] 南雪峰.超薄磨耗层矿料级配试验研究[J].公路,2009(4).
- [4] 韦魁,孙红,陈炜,等.OGFC 透水沥青路面在城市道路的应用[J].新型建筑材料,2007(6).
- [5] 程永春,付极,刘寒冰,等.超薄磨耗层沥青混合料路用性能试验研究[J].公路,2008(3).
- [6] 路凯冀,宋世海,李小东.国内外 Novachip(R)技术应用现

状[J].中外公路,2006(3).

- [7] 何春木,苏卫国.NovaChip 技术试验路工程实践[J].公路,2007(11).
- [8] 朱琨琨,刘黎萍,陈长,等.上海逸仙高架 NovaChip~超薄磨耗层降噪效果实测与分析[J].公路工程,2009(3).
- [9] 陈平,蒋曙萍,黄晓明,等.老化因素对沥青性能的影响[J].交通科技,2005(2).
- [10] 倪富健,茅勉,刘清泉,等.TPS 改性剂在排水性沥青混合料中的应用研究[J].公路交通科技,2004(10).

收稿日期:2019-03-12

基金项目:中国交建重大研发项目(编号:2016-ZJKJ-11)

作者简介:曾哲,男,硕士研究生,E-mail: zhezeng@whut.edu.cn

1 试验设计

透水沥青混合料以高黏改性沥青为原材料,其性质如表 1 所示。集料采用玄武岩,它的各项指标均满足相应的规范技术要求。基于空隙率与 2.36 mm 筛

孔通过率的关系,调试得到 18%、20%、22% 空隙率对应的 PAC-13 混合料级配曲线,同时利用沥青膜厚度法计算相应的沥青用量,通过谢伦堡沥青析漏试验和肯塔堡飞散试验验证计算结果,根据最终的级配和最佳沥青用量成型 PAC-13 试件,合成级配曲线如图 1 所示。

表 1 高黏改性沥青基本性能指标测试结果

针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	15 ℃ 延度/cm	动力黏度/ (Pa·s)	黏韧性/ (N·m)	韧性/ (N·m)
55.4	81.5	84.2	36 583	22.60	15.33

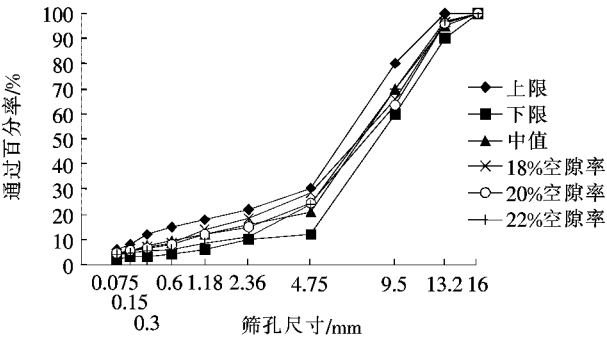


图 1 PAC-13 混合料级配曲线图

2 空隙率对 PAC-13 渗透性能的影响

连通空隙率的大小在一定程度上能够反映沥青混合料的渗透能力,CJJ/T 190-2012《透水沥青路面技术规程》中要求连通空隙率 $\geq 14\%$,该指标通常采用水中重法测试得到,该文采用 3 种不同目标空隙率对应的混合料连通空隙率(表 2)。

表 2 不同空隙率的 PAC-13 连通空隙率 %

目标空隙率	实测空隙率	连通空隙率
18	17.64	14.68
20	19.55	16.97
22	21.39	18.04

由表 2 可以看出:它们均满足规范指标的要求。并且随着空隙率的增大,连通空隙率也逐渐增大,且两者大致呈线性关系,说明当连通空隙率无法实测得到时,也可采用空隙率来初步表征混合料的透水性能。

渗水系数是反映 PAC 混合料渗透能力的一个重要指标,采用路面渗水仪对碾压成型的混合料进行测试,试验结果如表 3 所示,JTG D50-2006《公路沥青

路面设计规范》中对渗水系数的要求为 $\geq 900 \text{ mL}/(15 \text{ s})$,CJJ/T 190-2012《透水沥青路面技术规程》中对渗水系数的要求为 $\geq 800 \text{ mL}/(15 \text{ s})$ 。将实测数据与规范的技术指标相比,发现 3 种空隙率对应的沥青混合料均能满足要求,说明当空隙率 $\geq 18\%$ 时,透水沥青混合料能够较容易地满足渗透方面的功能需求。同时,可以看出渗水系数随空隙率增大的增长幅度并不显著,当空隙率由 18%变化至 22%时,渗水系数的增幅仅为 $322 \text{ mL}/(15 \text{ s})$,说明实际工程中无需过度追求空隙率,而应该保证路面在具有良好渗透性的同时,还应具备优良的力学性能。

表 3 不同空隙率的 PAC-13 渗水系数

目标空隙率/%	实测空隙率/%	渗水系数/ $[\text{mL} \cdot (15 \text{ s})^{-1}]$
18	17.64	1 451
20	19.55	1 534
22	21.39	1 773

3 空隙率对 PAC-13 抗析漏和抗飞散性能的影响

抗析漏和抗飞散性能都属于混合料 PAC-13 的重要路用性能,JTG F40-2004《公路沥青路面施工技术规范》中对它们的要求分别为 $< 0.3\%$ 和 $< 20\%$,CJJ/T 190-2012《透水沥青路面技术规程》中对它们的要求分别为 $< 0.3\%$ 和 $< 15\%$,该文对 3 种空隙率的 PAC-13 混合料分别进行了谢伦堡沥青析漏试验和肯塔堡飞散试验,试验结果如表 4 所示。

由表 4 可得:虽然 3 种目标空隙率的 PAC-13 析漏值始终满足规范要求,但是它的数值还是随着油石比的增加而明显增大,当油石比为 5.01%时,混合料的

表 4 不同空隙率 PAC-13 的析漏损失与飞散损失

目标空隙率/%	油石比/%	析漏损失/%	飞散损失/%
18	4.79	0.17	3.57
20	5.01	0.27	5.19
22	4.13	0.11	6.67

析漏损失已经十分接近规范值,说明进行透水沥青混合料配合比设计时,沥青用量不可过高。另外,可以观察到 3 种沥青混合料的飞散损失都比较小,虽然飞散损失随着空隙率的增加而增大,但无论规范值为 15% 还是 20%,混合料的测试结果都远低于不同规范的技术要求,当目标空隙率为 22% 时,飞散损失也仅为 6.67%。

4 空隙率对 PAC-13 高温稳定性的影响

路面在高温状态时,受到车辆荷载作用易发生永久变形。高温稳定性是反映透水沥青混合料路用性能的一个重要方面,一般利用车辙试验来评价。该文对 3 种 PAC-13 试件的高温稳定性进行了检测,不同目标空隙率对应的 PAC-13 动稳定度测试结果如表 5 所示。

表 5 不同空隙率的 PAC-13 车辙试验结果

目标空隙率/%	45 min 车辙深度/mm	60 min 车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
18	1.734	1.862	4 922
20	1.995	2.108	5 575
22	1.997	2.118	5 207

JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》中对透水沥青混合料动稳定度的要求为 $\geq 1\,500$ 次/mm(一般交通路段)和 $\geq 3\,000$ 次/mm(重交通路段),CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》中对它的要求为 $\geq 3\,500$ 次/mm。由表 5 可以看出:3 种不同空隙率的 PAC-13 混合料的动稳定度均高于两种规范列出的技术要求,且至少超出规范值 1 000 次/mm。从差值来看,空隙率的变化虽然影响了车辙试件的动稳定度,但不同空隙率试件的动稳定度差值并不显著($<1\,000$ 次/mm)。

5 空隙率对 PAC-13 水稳定性的影响

依据规范,进行了 3 种典型的混合料水稳定性试

验,分别为浸水马歇尔稳定度试验、冻融劈裂试验和浸水飞散试验,以此来探究不同空隙率条件下的 PAC-13 混合料的抗水损害能力。

5.1 浸水马歇尔稳定度

对 3 种不同空隙率的 PAC-13 混合料分别进行了浸水马歇尔稳定度试验,测试结果如表 6 所示。

表 6 不同空隙率的 PAC-13 残留稳定度测试结果

目标空隙率/%	马歇尔稳定度/kN	浸水马歇尔稳定度/kN	浸水残留稳定度/%
18	7.88	7.46	94.7
20	7.40	6.89	93.1
22	6.02	4.89	81.2

由表 6 可以看出:同一空隙率条件下,浸水后的试件马歇尔稳定度有所下降,说明浸水后试件内部产生了水损害现象。

在 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》中,对浸水残留稳定度的技术要求为 $\geq 80\%$ 。由表 6 可看出:3 种空隙率对应的 PAC-13 混合料均能满足规范指标,且随着空隙率的增大,浸水残留稳定度逐渐减小,当目标空隙率为 22% 时,混合料的浸水残留稳定度下降到 81.2%。因此,透水沥青混合料不能只追求空隙率和渗透性能,还应该考虑混合料的力学性质,空隙率过大可能会带来路面强度方面的损失,从而导致早期路面病害。从试验结果来看,18% 空隙率对应的混合料测试结果最佳。

5.2 冻融劈裂试验

JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》对冻融劈裂强度比的技术要求为 $\geq 70\%$,CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》对它的技术要求为 $\geq 85\%$ 。3 种不同空隙率的 PAC-13 混合料冻融劈裂试验结果如表 7 所示。

表 7 不同空隙率的 PAC-13 冻融劈裂试验结果

目标空隙率/%	未冻融劈裂抗拉强度/MPa	冻融劈裂抗拉强度/MPa	冻融劈裂强度比/%
18	0.50	0.43	86.0
20	0.49	0.42	85.7
22	0.42	0.34	81.0

由表 7 可以看出:相比于未冻融处理的试件,冻融循环后试件的劈裂抗拉强度会减小,说明冻融过程对 PAC-13 试件造成了内部结构的损伤和破坏。同时,

分析冻融劈裂强度比可发现,随着空隙率的增大,冻融劈裂强度比逐渐减小,其中 18%~20%对应的变化幅度较小,仅为 0.3%,而 20%~22%对应的变化幅度较为明显,为 4.7%。

当依据 CJJ/T 190—2012《透水沥青路面技术规程》时,仅有 18%和 20%空隙率对应的试件满足规范要求($\geq 85\%$),当依据 JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》时,3 种类型的试件均满足规范要求,这一方面说明前者的规范要求相对较高,如果按照此规程进行透水沥青混合料设计,需要着重考虑目标空隙率增大后混合料的强度损失;另一方面说明当空隙率达到 22%时,PAC 试件的水稳定性相对较差,在服役过程中容易受液态水侵蚀进而发生水损害现象。

5.3 浸水飞散试验

JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》对浸水飞散损失的技术要求为 $\leq 30\%$ 。3 种空隙率的 PAC—13 混合料浸水飞散试验结果如表 8 所示。与规范值相比可发现,3 种 PAC—13 试件的浸水飞散损失均远小于规范中的技术指标。另外,随着空隙率的增大,混合料的浸水飞散损失逐渐增大,这与前面两种水稳定性试验反映出的规律相同,表明较大的空隙率(22%)不利于沥青混合料的黏结性和强度。

表 8 不同空隙率的 PAC—13 浸水飞散试验结果

目标空隙率/%	飞散前试件质量/g	飞散后试件残留质量/g	混合料的飞散损失/%
18	1 160.0	1 113.1	4.04
20	1 133.8	1 063.3	6.22
22	1 124.5	1 040.8	7.44

与前面现象不同的是,在浸水飞散试验中,即使是空隙率为 22%的 PAC 试件,其浸水飞散损失也远小于规范要求值,说明在高黏改性沥青的作用下,透水沥青混合料整体的抗飞散能力能够得到有效的保障,即使浸水条件较苛刻时,混合料也不易受荷载作用而分散和破碎。

6 空隙率对 PAC—13 抗滑性能的影响

透水沥青混合料由于具有较多粗集料和大空隙的特点,它往往具有较好的抗滑性能,同时,抗滑性能也是透水沥青路面必须着重考虑的路用性能,通常采用摩擦系数试验和构造深度试验来进行评价,如果配合比设计选择的级配使道路不能具备足够的抗滑能力,

将对雨天行驶在沥青路面上的交通车辆造成重大安全隐患。

6.1 摩擦系数试验

JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》对摩擦系数的技术要求为 ≥ 58 。试验测试结果如表 9 所示。

表 9 不同空隙率的 PAC—13 抗滑性能试验结果

目标空隙率/%	摩擦系数	摊平砂的平均直径/mm	构造深度/mm
18	62.1	144	1.54
20	64.4	138	1.67
22	67.8	133	1.80

由表 9 可以看出:3 种空隙率条件下的摩擦系数测值均大于规范值(58),且随着空隙率的增大,摆式摩擦系数测定仪测试得到的摩擦系数也逐渐增大,但总体而言 3 种混合料试件的摩擦系数差值并不明显,空隙率由 18%变化至 22%时,摩擦系数变化的幅值只有 5.7,说明空隙率能够提升 PAC 混合料的摩擦系数,但是实际工程应用时不可过度依赖空隙率来实现路面抗滑的效果。

6.2 构造深度试验

JTG D50—2006《公路沥青路面设计规范》对构造深度的技术要求为 ≥ 0.55 mm。构造深度试验结果如表 9 所示。由表 9 可以看出:3 种 PAC—13 混合料均能满足规范要求,且与规范值相差较大,说明规范的技术要求相对偏低。另外,从结果中可看出:虽然较大的空隙率有利于透水沥青路面的抗滑性能,但是空隙率由 18%变化至 22%时,混合料的构造深度变化值仅为 0.26 mm,再次说明空隙率对混合料抗滑性能的提升是有一定限度的。

7 空隙率对 PAC—13 动态模量的影响

在 JTJ D50—2017《公路沥青路面设计规范》中,沥青混合料动态压缩模量直接用于路面结构设计及验算。传统方法采用 15 或 20 ℃时的混合料回弹模量,不能够反映混合料的温度及频率敏感性,因此,该文将探索透水沥青混合料在不同温度及频率条件下的动态单轴压缩模量,其中,温度可反映不同气候条件下的环境影响,加载时间可反映车辆速度及沥青层厚度的影响。

为了探究不同温度及频率下 PAC—13 混合料的动态模量特征,分别对 3 种目标空隙率的试件进行了

单轴压缩动态模量试验,试验温度分别为 -10 、 5 、 20 、 35 以及 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$,荷载频率分别为 0.1 、 0.5 、 1.0 、 5.0 、 10.0 以及 25.0 Hz ,最终以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为参考温度,根据沥青混合料的时温等效叠加原理,利用移位因子将已得到的不同温度对应频率下的动态模量转化到 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的动态模量,并采用西格蒙德模型拟合数据点来绘制主曲线,如图2所示。其中,移位因子和西格蒙德模型的表达式分别如式(1)、(2)所示。

$$\log a_T = \frac{-C_1(T - T_R)}{C_2 + (T - T_R)} \quad (1)$$

$$\log |E^*(f_r)| = \delta + \frac{\alpha}{(1 + e^{\beta + \gamma \log f_r})} \quad (2)$$

式中: C_1 和 C_2 为与材料自身相关的常数; T 为试验温度($^{\circ}\text{C}$); T_R 为参考温度($^{\circ}\text{C}$); $|E^*(f_r)|$ 为缩减频率下的动态模量(MPa); δ 和 α 为反映主曲线渐近线的值(MPa); β 和 γ 为形状参数。

由图2可以看出:3种空隙率对应的混合料动态模量都随着频率的增加而增大,且3条曲线的增幅和走势也有类似之处。另外,在同一频率条件下,当PAC-13混合料的空隙率由 18% 增加至 22% 时,随着目标空隙率的增加,混合料的动态模量具有减小的趋势, 22% 的沥青混合料强度相对较低。由主曲线反映的动态模量范围,可用于指导透水沥青路面结构验算时模量参数的选取。

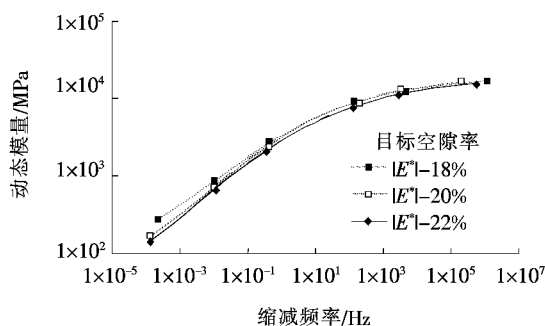


图2 PAC-13混合料动态模量主曲线

8 结论

(1) 由渗透性能试验的结果可以看出:连通空隙

率与空隙率呈现线性相关的关系,且连通空隙率和渗水系数均随空隙率的增加而增大,3种不同目标空隙率的PAC-13试件均满足渗透指标要求。

(2) 通过力学性能试验可看出:PAC-13的析漏损失随油石比的增加而显著增大,飞散损失随空隙率的增加而缓慢增大;在高温稳定性方面,空隙率为 20% 时混合料的动稳定度最高,说明此时骨架空隙结构相对稳定;在水稳定性方面,空隙率与水稳定性呈负相关关系,当目标空隙率为 22% 时,浸水残留稳定度接近规范值,冻融劈裂强度比则存在不满足规范值的情况;因此,实际工程中PAC-13的空隙率最好控制为 $18\% \sim 20\%$ 。

(3) 通过抗滑性能试验结果可看出:摩擦系数和构造深度均随空隙率的增加而逐渐增大,但空隙率对混合料抗滑能力的提升效果具有有限度,空隙率由 18% 变化至 22% 时,摩擦系数变化的幅值仅为 5.7 ,构造深度的变化值仅为 0.26 mm ,说明实际工程中不可过度依赖空隙率来实现路面抗滑的效果。

(4) 通过动态模量试验并绘制主曲线发现,3条主曲线的增幅和走势类似,当对应同一缩减频率时,空隙率为 22% 的混合料动态模量相对较小,说明其强度相对较低。

参考文献:

- [1] 同卫刚.生态型透水沥青路面结构设计与性能研究[D].长安大学硕士学位论文,2015.
- [2] 孙芳.基于海绵城市的城市道路系统化设计研究[D].西安建筑科技大学硕士学位论文,2015.
- [3] CJJ/T 190-2012 透水沥青路面技术规程[S].
- [4] JTG E40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [5] JTG D50-2006 公路沥青路面设计规范[S].
- [6] 林振华.湿热地区多孔排水沥青混合料路用性能研究[D].福州大学硕士学位论文,2014.
- [7] 孔祥杰,张金喜,袁晓斌,等.沥青路面抗车辙性能影响因素研究[J].中外公路,2016(3).
- [8] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] JTG E60-2008 公路路基路面现场测试规程[S].
- [10] JTG D50-2017 公路沥青路面设计规范[S].