

级配对排水沥青路面抗堵塞能力的影响研究

朱旭伟¹, 李波¹, 魏定邦^{1,2}, 李昊¹ 编译

(1. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院有限责任公司)

摘要:为研究级配与排水沥青混合料抗堵塞能力之间的关系,采用美国常用的10种OG-FC级配成型试件并采用变水头渗水仪进行渗水试验,以粒径0.15~0.3 mm的细砂作为堵塞材料进行逐次堵塞后的渗水试验,建立了表征级配粗细的级配参数 R_{15} 和堵塞前后不同试件的渗水系数(k)、初始堵塞率($CR_{\text{初始}}$)、二次堵塞率($CR_{\text{二次}}$)之间的相关关系,对排水沥青混合料的抗堵塞能力进行了研究。结果表明:排水沥青混合料级配的粗细对其堵塞前后的渗水系数有着显著的影响;清除堵塞后的渗水系数可恢复到初始渗水系数的69%; $CR_{\text{初始}}$ 较小时, $CR_{\text{二次}}$ 大于 $CR_{\text{初始}}$ 的一半, $CR_{\text{初始}}$ 较大时, $CR_{\text{二次}}$ 小于 $CR_{\text{初始}}$ 的一半;可以用 R_{15} 来估计不同时刻的渗水系数和二次堵塞率。

关键词:路面工程;排水沥青混合料;堵塞;渗水系数;级配

排水沥青混凝土多被应用于城市雨水管理和高速公路磨耗层中。与常用的密级配沥青混凝土相比,它具有抑制雨天行车水雾、降低交通噪声、增加可视性、提高路面抗滑性能、补给地下水以及过滤径流污染物等优点。但是,排水沥青路面在使用过程中,由于泥土、胎屑以及落叶等污染物在路面内部空隙中的沉积,堵塞成为影响排水沥青路面发展最主要的问题。Bishop、Nielsen、Isenring等均在实际应用中发现排水沥青路面在不养护的工况下,其使用寿命为1~5年。

除了堵塞颗粒能够导致排水沥青路面堵塞外,由于混合料中沥青的老化,沥青与集料之间的黏聚力下降,沥青脱落也会导致排水沥青混凝土被堵塞,从而降低排水沥青路面的渗透性。Fwa等采用堵塞材料对4种级配沥青混合料进行堵塞试验,然后测量其渗水系数。结果表明:在堵塞材料添加初期,渗水系数会迅速减小,随着堵塞材料的增加,渗水系数逐渐减小。同时发现,排水沥青混凝土的堵塞存在一个稳定状态,该状态可以作为排水沥青混合料设计时的一个耐久性指标;Suresha等对不同级配、不同油石比以及不同堵塞材料下混合料堵塞行为进行了研究,结果表明:初始渗水系数大于100 m/d的排水沥青混合料在达到稳定堵塞状态后表现出良好的排水能力;Hamzah等对单

层和双层排水沥青混凝土系统进行了堵塞和清除堵塞研究,结果表明:连续的堵塞和清除堵塞会破坏空隙结构的连续性,混合料更容易被堵塞。同时发现双层排水沥青路面比单层排水沥青路面的抗堵塞能力更好。

该文采用10种不同级配的排水沥青混合料试件进行渗水试验,通过建立表征级配粗细的粒径比参数 R_{15} 和堵塞前后渗水系数、初始堵塞率以及二次堵塞率之间的相关关系,旨在研究级配对排水沥青混合料抗堵塞特性的影响,为排水沥青混合料的级配设计以及排水沥青混凝土路面的后期养护提供参考。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

采用PG 76-22的SBS改性沥青,集料均采用花岗岩矿料,填料采用石灰石矿粉,此外,加入1%的消石灰和纤维素分别作为抗剥落剂和稳定剂。

1.2 试件制备

按照美国常用的10个OGFC级配,每种级配采用旋转压实仪制备直径150 mm、高度 (115 ± 5) mm的排水沥青混合料试件3个。各排水沥青混合料试件的配合比见表1。

收稿日期:2019-12-12(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51408287,51668038);长江学者和创新团队发展计划滚动项目(编号:IRT_15R29);甘肃省杰出青年基金资助项目(编号:1606RJDA318);甘肃省自然科学基金资助项目(编号:1506RJZA064);兰州交通大学优秀科研团队项目(编号:201606)

表 1 各排水沥青混合料试件配合比

混合料 编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%								$D_{15}/$ mm	油石比/ %
	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.075		
A	100	93.0	66.0	21.0	8.0	—	—	3.0	3.44	7.2
B	100	91.0	47.5	15.0	7.0	—	—	3.0	4.75	7.3
C	100	97.5	65.0	8.0	4.0	—	—	4.0	5.17	6.7
D	100	99.0	95.0	33.0	10.0	—	—	3.5	2.75	7.2
E	100	100	90.0	22.5	15.0	—	—	3.5	2.36	7.3
F	100	100	87.5	35.0	10.0	—	—	2.0	2.71	7.3
G	100	97.5	60.0	25.0	8.5	—	—	1.5	3.11	7.2
H	100	100	96.0	48.5	25.0	14.0	—	2.3	1.26	7.5
I	100	97.5	48.0	25.0	10.0	8.0	6.0	3.5	2.98	7.0
J	90.5	63.0	45.0	17.0	11.0	—	—	3.5	3.76	7.0

注: D_{15} 为级配中通过率为 15% 的当量孔径尺寸。

1.3 试验方法

1.3.1 空隙率试验方法

分别按照 ASTM D7063 的真空密封法和 ASTM D2041 测定计算每个试件的毛体积相对密度和理论最大相对密度,然后利用毛体积相对密度和理论最大相对密度计算试件的空隙率。

1.3.2 渗水系数试验方法

如图 1 所示,采用变水头渗水仪测定每个试样的渗水系数。在测试之前,先用塑料薄膜包裹试件的侧面积,塑料薄膜应高出试件一定的高度,以保证水流在试件内部流动,使用油腻子将试件与立管、塑料薄膜之间密封,以防止水流流出。然后打开阀门,从试件下方的出水口加水,直到水位到达试样顶部将空气全部排出试件。然后关闭阀门,向立管中加水至高于试件顶面大约 375 mm。排水沥青混合料试件的渗水系数按式(1)计算,计算时以水面从 300 mm(h_1)下降到 75 mm(h_2)所需的时间 t 为标准。

$$K_{\text{初始}} = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad (1)$$

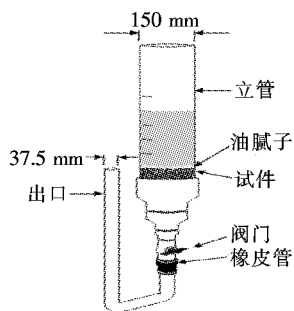


图 1 变水头渗水仪

式中: $K_{\text{初始}}$ 为路面渗水系数(mm/s); a 为立管的横截面积(mm^2); L 为试样的高度(mm); A 为试样的横截面积(mm^2)。

1.3.3 堵塞试验方法

(1) 在测试完初始渗水系数之后,以 0.15~0.3 mm 细砂为堵塞材料,按照 ASTM E965 铺砂法对混合料进行初次堵塞,记录堵塞每个试件的表面空隙所需的细砂质量 m ,然后直接测量每个试件的渗水系数 K_{TD} 。

(2) 用自来水逆向冲洗试件,测量其渗水系数。

(3) 在试件表面均匀地撒布 15 g 细砂,然后测量其渗水系数。

(4) 重复步骤(3),直至添加的细砂质量大于步骤(1)中使用的细砂质量 m 。

2 结果与讨论

2.1 空隙率

图 2 为不同级配排水沥青混合料空隙率和有效空隙率的试验结果。由图 2 可知:10 种不同级配混合料的空隙率分布范围为 10%~22.1%,级配最细的混合料 H 的空隙率最小(10%),有效空隙率为 8.4%;级配最粗的混合料 C 的空隙率最大(22.1%),有效空隙率为 20%。

排水沥青混合料 2.36 mm 通过率和空隙率的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可知:空隙率和 2.36 mm 通过率有良好的线性关系,2.36 mm 筛孔的通过率越大,空隙率越小。粗细集料的分界筛孔为 2.36 mm,2.36 mm 筛孔的通过率越大说明细集料含量越多,混

合料级配越偏细。因此级配粗细对混合料的空隙率和有效空隙率有着显著性影响,随着级配的变化,混合料的空隙率和有效空隙率显著不同。

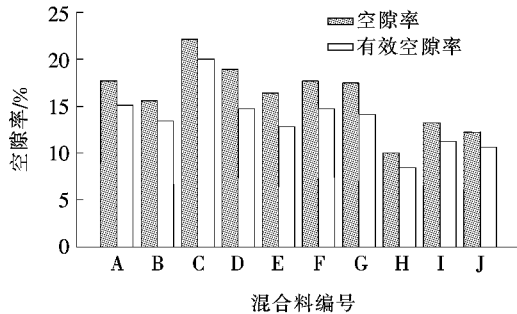


图2 级配对排水沥青混合料空隙率的影响

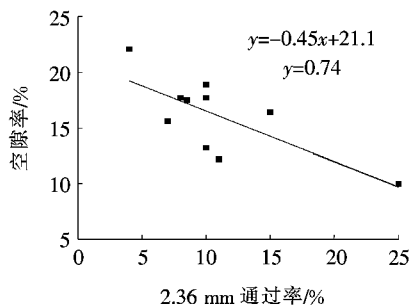


图3 2.36 mm 通过率与空隙率的关系

2.2 初始渗水系数

图4为不同级配排水沥青混合料初始渗水系数的试验结果。由图4可以看出:不同级配试件的初始渗水系数和其空隙率有着相同的变化趋势。级配最细的混合料H的渗水系数最小;级配最粗的混合料C的渗水系数最大。除E和H两种混合料外,其他混合料的初始渗水系数均大于建议值100 m/d。

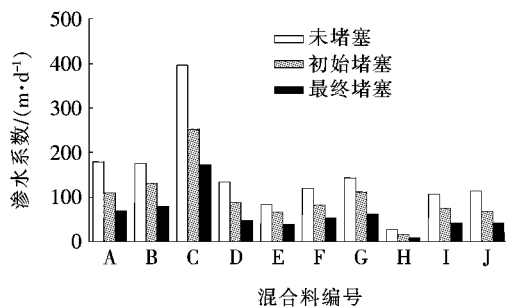


图4 不同级配排水沥青混合料的渗水系数

图5为2.36 mm筛孔通过率与初始渗水系数之间的关系曲线。由图5可以看出:排水沥青混合料的初始渗水系数和2.36 mm通过率有很好的相关关系,随着2.36 mm筛孔通过率的增加,初始渗水系数先迅速减小,然后逐渐趋于平缓,说明级配粗细对混合料的

渗水系数有着显著性影响,随着级配的变化,混合料的渗水系数显著不同。

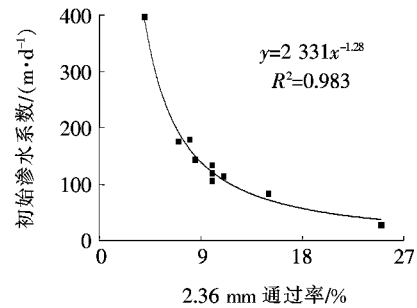


图5 2.36 mm 通过率与初始渗水系数的关系

2.3 堵塞

2.3.1 初始堵塞

在初始堵塞之后,直接测量填充细砂后试件的渗水系数(K_{TD}),结果如图4所示,由图4可知:随着堵塞物质的加载,试件的渗水系数显著降低,但是其并未减小至零。造成以上结果可能有两个原因,一个是试件内部的一部分空隙大于细砂的粒径;另一个是细砂本身由于其粒径和级配而具有一定的渗透性。初始堵塞率按照式(2)计算:

$$CR_{\text{初始}} = \frac{K_{TD} - K_{\text{初始}}}{m} \quad (2)$$

式中: $CR_{\text{初始}}$ 为初始堵塞率; $K_{\text{初始}}$ 为未堵塞时的渗水系数; K_{TD} 为添加细砂后试件的渗水系数; m 为首次堵塞每个试件的表面空隙所需的细砂质量。

图6为初始渗水系数和清除堵塞后试件渗水系数之间的线性回归曲线。

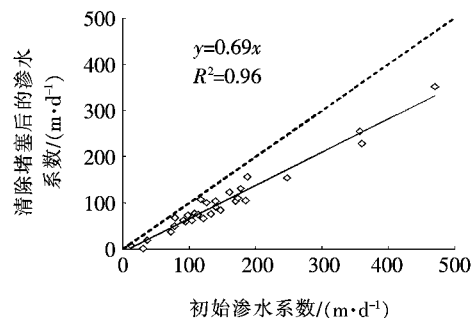


图6 初始渗水系数对清除堵塞后试件渗水系数的影响

由图6可以看出:清除堵塞后的渗水系数并未完全恢复到初始值,而是恢复到了初始渗水系数的69%。这可能是因为砂粒迁移到了排水沥青混合料试件内部空隙中,用水只能冲洗掉试件表层和浅层的砂粒,对于试件内部空隙中的砂粒无法清除,所以渗水系数只能恢复一部分。

2.3.2 逐步堵塞

图 7 为不同级配的排水沥青混合料试件逐步堵塞时的渗水系数。

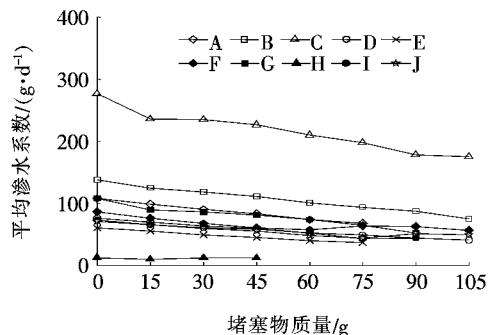


图 7 不同级配的排水沥青混合料试件逐步堵塞时的平均渗水系数

由图 7 可以看出：在逐步加载细砂时，每种级配的排水混合料试件的渗水系数以相对线性的趋势逐渐减小。堵塞后试件内部的渗流可以用达西定律来解释，其渗流量与渗流路径成反比关系。随着堵塞物质的积累，渗流路径增大，渗流量减小，因此渗水系数呈线性趋势减小。

对比级配 C 和级配 H 试件的渗水系数变化曲线，可以发现粗型级配加载堵塞物质的次数大于细型级配的加载次数，说明粗型级配的抗堵塞能力更好。这可能是因为粗型级配中大粒径的集料嵌挤构建的空隙比细型级配中小粒径的集料构建的空隙大，更容易形成透水的途径，所以不容易被堵塞。

二次堵塞率 ($CR_{二次}$) 可以定义为第一次堵塞后，渗水系数随着加载堵塞物质质量的变化率的平均值。图 8 为每种级配的初始堵塞率和二次堵塞率的分布图。

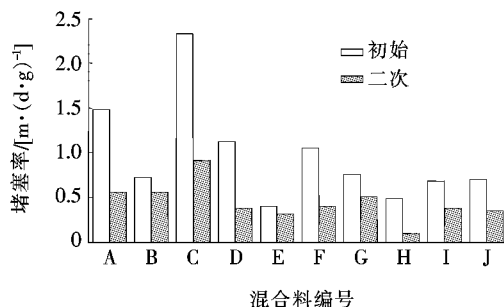


图 8 堵塞率分布图

由图 8 可知：初始堵塞率和二次堵塞率之间存在着显著的差异，二次堵塞率相比于初始堵塞率，大约减小了 50%。Suresha 的研究指出当堵塞材料首次加入排水沥青混合料时，渗水系数急剧下降，随着堵塞物质加载量的增加，渗水系数逐渐减小，最后趋于一个稳定

值 K_C 。当用水冲洗试样后，其渗水系数可以逐渐恢复到 K_R ，如图 9 所示。因此，二次堵塞率可以作为排水沥青路面规划和设计的一个重要参数，也可以为排水沥青路面的清除堵塞周期提供参考。

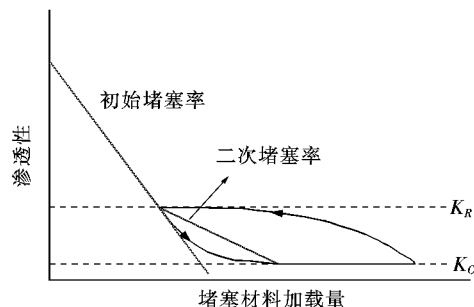


图 9 堵塞材料加载量对渗透性的影响

2.4 初始渗透率对堵塞率的影响

图 10 为初始渗水系数与初始堵塞率和二次堵塞率之间的线性回归曲线。

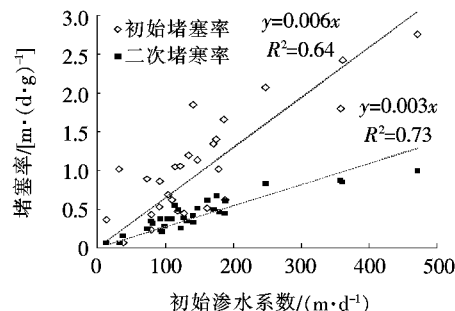


图 10 初始渗水系数对堵塞率的影响

由图 10 可知：初始堵塞率和二次堵塞率都与初始渗水系数之间具有良好的线性相关性，比较两条曲线的斜率关系可以发现，二次堵塞率大约为初始堵塞率的一半。

为了进一步验证初始堵塞率与二次堵塞率的关系，建立二者之间的关系曲线如图 11 所示（虚线表示二次堵塞率是初始堵塞率的一半，实线表示二次堵塞率和初始堵塞率之间的实际关系）。

由图 11 可知：在初始堵塞率较小时，数据点大多落在虚线的上边，这意味着二次堵塞率大于初始堵塞率的一半。这可能是由于初始堵塞率小的试件含有较小的空隙，限制了砂粒进入较深的空隙中，用水冲洗时，表面的砂粒很容易被清除，试样会恢复到近似初始状态，再次进行堵塞时，其二次堵塞率和初始堵塞率会近似相等。而在初始堵塞率较大时，数据点大多落在虚线的下边，二次堵塞率和初始堵塞率之间的关系小于 1:2。这是由于试件空隙较大，砂粒较容易进入试件的内部，而进入试件内部的砂粒不容易被清除。

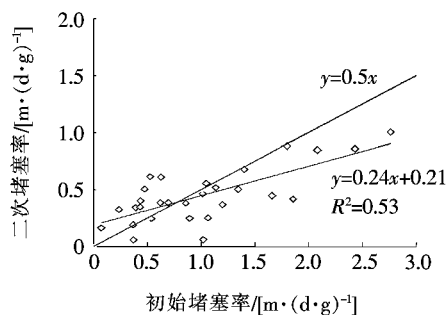


图 11 初始堵塞率对二次堵塞率的影响

2.5 级配对渗透性和堵塞率的影响

由 2.1 和 2.2 节可知:级配组成对排水沥青混合料的空隙率、渗水系数有显著的影响,此外,细集料含量是影响排水沥青混合料空隙率和渗水系数的主要因素,参考已有研究,选用级配中通过率为 15% 作为控制粒径。用 D_{15}^{PA} 与 D_{15}^{CM} 的比值 R_{15} 来表征排水混合料级配和堵塞材料级配之间的影响。

$$R_{15} = \frac{D_{15}^{PA}}{D_{15}^{CM}} \quad (3)$$

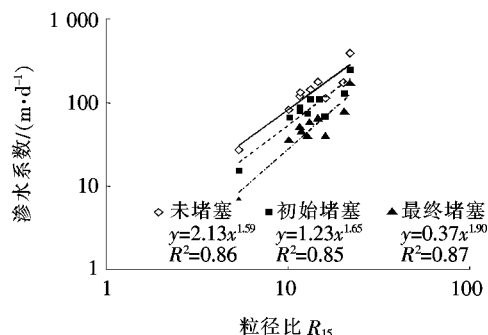
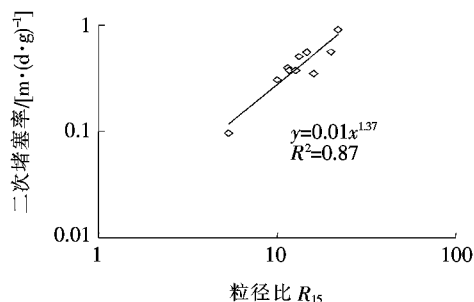
式中: D_{15}^{PA} 为排水沥青混合料级配构成中占集料总质量 15% 时的控制粒径; D_{15}^{CM} 为堵塞材料级配构成中占集料总质量 15% 时的控制粒径。

在该研究中堵塞材料采用 0.15~0.3 mm 的同一种细砂, D_{15}^{CM} 为一个定值,因此 R_{15} 的大小只与 D_{15}^{PA} 有关。图 12(a) 为 R_{15} 与不同堵塞条件下渗水系数的回归曲线。由图 12(a) 可知: R_{15} 与不同堵塞条件下渗水系数的决定系数分别为 $R_{未堵塞}^2 = 0.860$, $R_{初始堵塞}^2 = 0.850$, $R_{最终堵塞}^2 = 0.870$,均大于决定系数临界值 $R_{min}^2 = 0.399$,说明两者之间具有很好的相关性。 D_{15}^{PA} 越大,粗集料占比越多,随着 D_{15}^{PA} 的增大,渗水系数也随之增大。

图 12(b) 为 R_{15} 与二次堵塞率的回归曲线。由图 12(b) 可知: R_{15} 与二次堵塞率的回归方程为 $y = 0.01x^{1.37}$,决定系数 $R^2 = 0.870$,说明两者之间具有很好的相关性。随着 R_{15} 的增大,二次堵塞率逐渐增大。因为 R_{15} 的大小只与 D_{15}^{PA} 有关,因此,粗集料越多,级配越粗,空隙越大,混合料的抗堵塞能力越强,这与图 10 表明的结论相同。

3 结论

(1) 排水沥青混合料的渗水系数与级配有很强的

(a) R_{15} 与渗水系数(b) R_{15} 与二次堵塞率图 12 R_{15} 对不同堵塞条件下的渗水系数和二次堵塞率的影响

相关性。可以用 R_{15} 来描述排水沥青混合料级配的粗细。随着 R_{15} 的增大,排水沥青混合料的渗水系数也随之增大。堵塞后的排水沥青混合料的渗水系数也有相同的变化趋势。

(2) 在添加堵塞物质初期,排水沥青混合料的渗水系数会迅速减小,之后逐渐减小,最后趋于稳定。用水冲洗完堵塞物后,排水沥青混合料的渗水系数只恢复到初始渗水系数的 69%。

(3) 初始堵塞率较小时,二次堵塞率大于初始堵塞率的一半;初始堵塞率较大时,二次堵塞率小于初始堵塞率的一半;二次堵塞率和 R_{15} 有很强的相关性,可以通过 R_{15} 来估算二次堵塞率。

(4) 建议排水沥青路面在设计时使用 R_{15} 较大的粗型级配以提高排水沥青路面的抗堵塞能力。

——编译自: William D. Martin, Bradley J. Putman, Andrew I. Neptune. Influence of Aggregate Gradation on Clogging Characteristics of Porous Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(7): 1-7.