

透水混凝土基层抗堵塞试验设计及微观机理观测

李梦娟¹, 李博楠²

(1. 河北冀通房地产开发有限公司, 河北 石家庄 050035; 2. 中交路桥科技有限公司, 河北 石家庄 050011)

摘要: 透水混凝土基层是“海绵城市”建设中道路铺装的重要组成部分,但在使用过程中难免会产生淤堵现象,造成透水功能失效,部分或全部丧失其使用功能。为了解透水混凝土堵塞后使用性能的变化,基于实际工况状态,制备泥浆模拟透水混凝土基层的堵塞介质,通过设计一种抗堵塞性能试验测试其渗透性能的衰减情况,并利用扫描电镜方式观测其内部孔隙受堵塞后的变化情况。结果表明:设计的透水混凝土基层抗堵塞试验能够有效模拟透水混凝土使用过程中的堵塞情况。本文成果可为透水混凝土的进一步应用提供相关参考。

关键词: 透水混凝土; 基层; 抗堵塞试验; 扫描电镜; 海绵城市

中图分类号: U416.216

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)07-0006-04

doi:10.13402/j.gcjs.2024.07.084

Experimental design and microscopic mechanism observation for anti-clogging of permeable concrete substrate

LI Mengjuan¹, LI Bonan²

(1. Hebei Jitong Real Estate Development Co., Ltd., Shijiazhuang 050035, Hebei, China;

2. Zhongjiao Road & Bridge Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, Hebei, China)

Abstract: The permeable concrete substrate is an important component of road pavement in the construction of “sponge city”, but it is inevitable that there will be siltation in the process of use, resulting in the failure of permeable function and partial or total loss of its use function. In order to understand the change of the use performance of permeable concrete after blockage, based on the actual working conditions, the mud is prepared to simulate the blocking medium of permeable concrete substrate, and the attenuation of its permeability is tested by designing an anti-clogging performance test, and the change of its internal pores after blockage is observed by scanning electron microscope. The results show that the anti-clogging test of the designed permeable concrete substrate can effectively simulate the clogging of permeable concrete during use. The results can provide relevant references for the further application of permeable concrete.

Key words: permeable concrete; substrate; anti-clogging test; scanning electron microscopy; sponge city

随着我国“十四五”规划对“进一步推动海绵城市建设示范工作,重点聚焦解决城市防洪排涝方面的难题”的提出,透水沥青路面、透水砖、透水混凝土等一系列透水铺装材料成了研究热点^[1]。透水混凝土以其良好的力学性能、渗透性能、与透水铺装中的基层材料有着良好的适配性,在许多城市道路工程中采用开级配抗滑磨耗层

(open graded friction course, OGFC)+大孔隙透水混凝土,成为海绵城市建设中的一道亮点^[2]。

但与此同时,透水路面在服役一段时间后产生的孔隙堵塞限制了透水混凝土的进一步应用,许多路段的透水铺装的使用年限往往局限于1~2 a,便丧失或部分丧失其透水功能而成为普通铺装,因此有必要对抗堵塞性能进行研究。郭桂香^[3]对透

收稿日期: 2023-01-16

基金项目: 河北省建设科技研究指导性计划资助项目(2022-2042)

作者简介: 李梦娟(1992—),女,工程师,从事建筑与市政工程方面的工作。

水混凝土的骨料粒径对其渗透性能的影响进行了研究,发现随着粒径的增大,透水混凝土的渗透性能增强,当骨料粒径范围为 13.2~16.0 mm 时,透水混凝土的力学性能与渗透性能均衡;谢西等^[4]选择砂砾、黏土和油污作为堵塞物,对透水混凝土进行堵塞试验,发现油污的堵塞效果最为严重;胡念^[5]通过淋水-干燥循环的方式对撒布砂砾和黏土的全级配透水混凝土路面进行现场堵塞试验,发现全级配透水混凝土在经受砂砾堵塞后,其渗透性能衰减最为严重的。截至目前,我国尚未颁布统一的透水混凝土试验标准,抗堵塞试验也处于摸索和探讨阶段。本文通过设计一种透水混凝土基层材料的渗透-堵塞循环试验,充分了解透水混凝土堵塞后内部孔隙的变化情况及其渗透性能衰减情况,以期为透水混凝土的配合比设计及使用过程中的养护清理提供一定的借鉴与参考。

1 透水混凝土基本指标

《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)、《透水混凝土路面技术规程》(DB11/T 775—2010)要求,透水混凝土面层的有效孔隙率应当不低于 10%。而基层材料的渗透系数应当高于面层,因此试验透水混凝土的孔隙率取 20%。参考透水混凝土设计最大理论密度公式及美国国家高速公路和交通运输协会标准(American association of state highway and transportation officials, AASHTO)推荐的水泥稳定碎石排水基层的第五十五/五十六号级配的基础上^[5],考虑到美国 AASHTO 排水基层级配要求中无对 13.2、16.0 mm 孔径通过率的要求,透水

混凝土级配设计范围如表 1 所示。

目前,国内常用的透水混凝土的设计理论:由粗集料颗粒紧密堆积形成骨架,再由细集料、水泥等材料按照其相应的绝对体积对骨架间隙进行填充,其余未被填充的部分则作为透水混凝土的有效孔隙。试验选择体积法作为设计理论,即确定某一级配条件下再生粗集料的紧密堆积孔隙率或堆积密度,根据目标孔隙率要求对其孔隙中的填料或浆体体积进行计算,并依据强度指标确定目标所需的水灰比范围,依次计算出水泥用量、需水量等必要参数^[6]。为满足设计及力学要求,拟定水灰比为 0.4,计算得出集料用量为 1 447 kg/m³。采用二次插捣法制备边长为 100 mm 的立方体试件,再进行 28 d 标准养生后备用。

2 堵塞介质确定

透水混凝土是一种具有较强抗压能力的大孔隙铺装材料。相比于透水沥青面层,由其形成的路面结构,受到上层面层类似于“过筛”后的保护,其堵塞介质的组成成分类似于饱和泥浆或饱和悬浮泥浆^[7]。考虑到我国地域辽阔,不同城市、地区间的土质、地表灰尘粒径存在一定的差异,调研石家庄等共计 6 座华北地区的城市地表层尘土和雨水分布情况,对该区域内的地表雨积水进行采样试验和烘干,对剩余物采用《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》(JGJ 52—2006)进行试验,结果如表 2 所示。

结合上述试验结果,选择 30% 含泥量作为试验饱和泥浆指标,颗粒级配如表 3 所示,搅拌均匀后备用。

表 1 透水混凝土级配设计范围(质量分数) %

<2.36 mm	(2.36,4.75]	(4.75,9.50]	(9.50,13.20]	(13.20,16.00]	(16.00,19.00]	(19.00,26.50]	(26.50,31.50]
2.0~2.5	4.0~7.5	30.0~42.5	48.0~57.5	67.5~77.5	90.0~95.0	100.0	100.0

表 2 石家庄等 6 地区地表雨积水物理性能指标

pH 值	密度/ (g·cm ⁻³)	平均含 泥率/%	饱和悬液 浓度/(g·L ⁻¹)	粒度组成(质量分数)%			
				>1.180 mm	(0.000,1.180]	(0.075,0.600]	≤0.075 mm
6.1	1.224	31.2	5.2	14.4	25.4	43.6	16.6

表 3 泥浆用土颗粒级配范围 %

>2.360 mm	(1.180,2.360]	(0.600,1.180]	(0.300,0.600]	(0.150,0.300]	(0.075,1.150]	≤0.075 mm
100.0	85.0~90.0	66.0~75.0	32.0~45.0	27.5~40.0	15.0~20.0	3.0~5.0

3 抗堵塞试验设计

抗堵塞试验应最大程度还原或模拟道面受降水影响后产生的实际情况。结合《降水量等级》(GB/T 28592—2012)及中国气象网中河北省近 50 a 来降水分布情况^[8],假定一次堵塞循环为一次大暴雨,模拟透水混凝土在服役期间渗透性能的衰减变化情况,设定每 3 次“淋泥—干燥”循环(堵塞循环)后进行一次渗透性能测试,共进行 15 次堵塞循环即 5 次渗透测试,当达到测试循环次数或某组任一试件的渗透系数为 0 时,停止试验^[8]。

堵塞试验共分 5 组(A~E 组),每组 4 个试件,其中 1 个为空白对照。试验温度范围为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度范围为 $60\% \pm 10\%$ 。为模拟透水混凝土基层在受面层“过滤”后的渗透情况,设置 30 mm 初始水头高度,每次采用 3 L 泥浆进行循环。按照 CJJ/T 135—2009 中透水混凝土渗透系数的测试方法进行空白对照组及淋泥规定次数后的参数测试。

按式(1)进行渗透系数计算,以每组 3 个试件的平均值作为试验结果^[9]。

$$k = \frac{QL}{A(h_1 - h_2)} \quad (1)$$

式中: Q 为单位时间内水流体积, mm^3 ; k 为渗透系数; A 为材料横截面积, mm^2 ; h_1 、 h_2 分别为试验装置上下表面液位差, mm; L 为材料高度, mm。

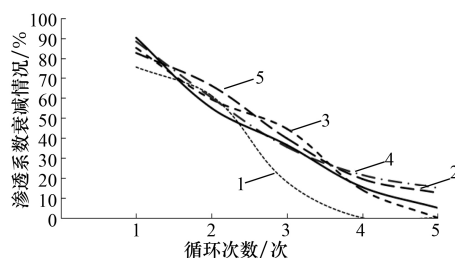
4 结果分析

4.1 试验结果分析

预定测试次数下的各组试件的渗透系数衰减比例如图 1 所示。由图 1 可知:随着试验次数的增长,呈现线性衰减情况,其中 A 组试件循环 12 次后出现渗透系数为 0 的“堵死”情况, C 组试件循环 15 次后同样出现衰减为 0 的情况。透水混凝土在经过 12~15 个循环情况后基本丧失渗透性能,其正常服役寿命和保养维修周期则可参照当地的降水情况进行确定。

4.2 扫描电镜结果分析

透水混凝土的渗透性能源自于其内部的孔隙结构,因此仅从宏观角度对透水混凝土进行试验分析并不全面,需要从微观层面对透水混凝土的



1—A 组; 2—B 组; 3—C 组; 4—D 组; 5—E 组。

图 1 渗透系数衰减情况试验结果

孔隙特征进行研究。为了解透水混凝土在堵塞前后内部孔隙发生的变化,结合切片法和数字图像处理技术,选择对循环 15 次后的 C 组试件进行扫描电镜试验。将堵塞试验后的试件及空白试件进行切割(图 2),采用低倍工业扫描电镜对其内部孔隙分布情况进行分析,结果如图 3 所示。由图 3 可知:经历一定次数循环的堵塞试验后,试件内部仍存在一定数量的孔隙,但试件迎水面方向的孔隙较空白对照试件有着明显减少。说明在模拟试验过程中,泥浆的堵塞行为随着水力梯度的衰减而逐渐增强,而其下部孔隙由于在上部孔隙堵塞后无法再进行渗透行为而保留较好。

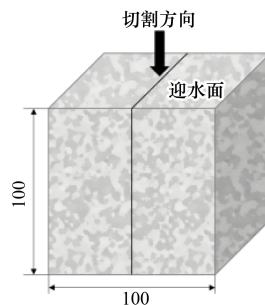
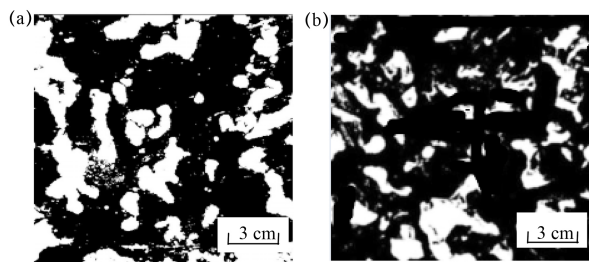


图 2 透水混凝土试件切割方式

mm



循环次数/次: (a) 0; (b) 15

图 3 试件扫描电镜分析结果

为确定各试件孔隙参数,利用图像分析软件 Image Pro plus 将 C 组试件图形结果进行二值平面化处理,结果如表 4 所示。由表 4 可知:当试件经历 15 次堵塞循环后,试件内部孔隙的各项几何参数

表 4 试件内部孔隙投影信息参数分析结果

试件类型	有效面积/(mm ² ·dm ⁻²)		平均面积/ (mm ² ·dm ⁻²)	孔隙面积 占比/%	孔隙轴线倾角 45°~90°占比/%	边际开口 孔隙占比/%
	最大	最小				
空白对照试件	16.64	0.39	4.17	22.4	62.5	15.2
五次循环后试件	5.23	0.16	1.59	8.5	49.5	14.2

注：孔隙轴线为内部孔隙长轴方向与水平面的夹角，当孔隙轴线倾角>45°时，可认为其渗透行为较好^[10]。

均有显著衰减，内部孔隙平均面积降低约 75.4%，孔隙面积占总截面面积占比降低约 67.9%。

5 结 论

透水混凝土的渗透性能与抗淤堵性能是评价和衡量其排水功能价值的重要标准。本文根据调研石家庄等城市地表层尘土和雨水分布情况，制备了符合华北地区气候特点的模拟泥浆，通过设计一种针对透水混凝土的抗堵塞试验，测试了透水混凝土试件在经历一定堵塞循环次数后的渗透系数；同时，对经历 15 次堵塞循环前后的透水混凝土试件进行了切割扫描。试验结果表明，在一定循环堵塞作用次数后，透水混凝土的渗透性能呈现显著衰减现象；内部孔隙二维结果表明，在一定循环堵塞作用次数后，透水混凝土内部孔隙几何特征显著降低，且堵塞主要发生在迎水面，透水混凝土试件的内部孔隙仍有较多部分未被堵塞。不同地区可根据当地雨积物的分布特征进行堵塞试验分析，从而优化配合比设计，延长其使用寿命；从考虑后期保养和使用过程的优化角度来看，可从配合比设计或施工工艺（如振捣方式）等角度提高透水混凝土上部孔隙占比及迎水面开口孔隙的比例，或通过高压冲洗等方式改善经堵塞后的透水混凝土铺装表面，以期优化或恢复透水混凝土渗透功能。

参考文献：

[1] 孟博雯. 透水混凝土路面堵塞清理的数值模拟和试验研究[D]. 济南:山东大学,2022.

[2] 李龙,何宏智,赵泽天,等. 透水混凝土路面堵塞物与路面堵塞性能的试验研究[J]. 住宅与房地产, 2021(31):213-214.

[3] 郭桂香. 集料骨架结构对多孔混凝土性能的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.

[4] 谢西,姜成,林晨彤,等. 透水混凝土路面堵塞及其恢复效果研究[J]. 中外公路,2019,39(1):46-49.

[5] 胡念. 透水混凝土路面周期性维护的现场试验研究[D]. 济南:山东大学,2021.

[6] 高鹏. 透水混凝土堵塞机理、疲劳及抗冻性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

[7] 夏霜. 透水路面结构抗堵塞性能的优化[D]. 济南:山东大学,2021.

[8] 张晶. 透水混凝土抗堵塞性能室内模拟实验研究[J]. 水利技术监督,2021(5):12-14.

[9] 韦万峰,熊剑平,周胜波,等. 透水混凝土抗堵塞性能研究[J]. 新型建筑材料,2021,48(2):69-73;77.

[10] 史俊礼. 饱和泥浆法透水混凝土抗堵性试验研究[D]. 郑州:河南大学,2020.