

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.05.009

聚氨酯碎石和透水砖两种人行铺装结构及性能对比

王元元^{1,2}, 刘燕燕², 何顺顺³, 刘天诚³, 许家硕³, 梁浚枫³(1. 湖北文理学院 土木工程与建筑学院, 湖北 襄阳 441053; 2. 重庆交通大学 材料科学与工程学院;
3. 重庆外国语学校)

摘要:为了更好地指导聚氨酯基透水人行道的铺装,服务海绵城市建设,该文从路面结构组成、力学性能和抗堵塞效果3个方面,对比分析了聚氨酯碎石和透水砖两种透水人行道铺装的异同。结果表明:两种铺装的路面结构大致相同,但聚氨酯碎石铺装比透水砖铺装具有更好的整体性、结构稳定性和铺装高效性;聚氨酯混合料属于柔性材料,具有较好的抗疲劳性能和更好的透水性能,但其抗冻性能却较差;抗堵塞率和渗透系数变化率均表明聚氨酯混合料具有更好的抗堵塞效果。因此,聚氨酯基透水人行道的铺装用于海绵城市建设具有整体性好、铺装效率高、柔韧性好、抗堵塞性能好、透水效果好等优势。

关键词:道路工程;聚氨酯;透水路面;人行道

随着社会经济的持续快速发展,城市基础设施建设的不断推进,越来越多的城市地表被水泥混凝土、人行道砖、沥青混凝土等不透水材料覆盖,致使地下水资源不能得到及时有效补充,进而引发地表沉降、热岛效应、城市内涝等问题。为了解决上述困扰,海绵城市建设应运而生,倡导城市建设应注重生态环保、绿色、可持续发展等理念,及时还原地下水资源,并在需要时加以释放。其中,透水路面铺装因具有吸声降噪、缓解地表径流、保护地下水资源、缓解城市热岛效应等功能,已成为海绵城市建设中关注的重点和热点。

该文所研究的大孔隙聚氨酯碎石(PPM)铺装孔隙率可达30%以上,透水性和吸水性能良好,具有

高透水、环保、降噪、防雪抗冻、舒适美观等特性。Chen等通过抗堵塞试验研究了PPM的耐久性,发现传统大空隙沥青磨耗层(OGFC)的质量堵塞率为25%,而PPM的堵塞率仅为5%,具有优异的抗堵塞特性;文献[6、7]分别研究了PPM的力学性能和抗冰除冰效果,结果表明:PPM的力学性能可以在一个较宽的范围内变化,介于沥青混合料和水泥混凝土之间。此外,PPM结冰试件的抗拉拔力和抗剪切力只有沥青混合料的50%和55%,破冰断裂功也只有沥青混合料的50%,表明PPM具有良好的抗冰除冰效果;邵洪涛等对PPM的施工操作性进行统计,发现对PPM透水路面的铺装,每人每天可完成200 m²以上的铺装任

- *****
- [13] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京:气象出版社,2002.
- [14] 陈子建. 沥青路面行驶质量研究[D]. 同济大学硕士学位论文,1996.
- [15] 张金喜,苏蕊蕊,王锋. 路面平整度与驾驶速度关系的实验研究[J]. 武汉理工大学学报,2011(10).
- [16] 贾洪飞,雒志才,张泉雄,等. 高速公路后评价油耗指标的确定与对比[J]. 吉林大学学报(工学版),2004(2).
- [17] 张占军,王笑风. 沥青路面使用性能的双参数修正预测模型[J]. 交通运输工程学报,2007(5).
- [18] 张倩. 基于生命周期理论的沥青路面养护环境评价方法研究[D]. 北京工业大学硕士学位论文,2015.
- [19] ISO 14040 Environmental Management e Life Cycle Assessment e Principles and Framework[S].
- [20] 亿科环境. 中国生命周期基础数据库(Chinese Life Cycle Database,CLCD)[DB/OL]. (2012-09-05)[2014-10-30]. <http://www.ike-global.com/>.
- [21] 徐剑. 公路全寿命周期能耗分析与节能减排[M]. 北京:人民交通出版社,2016.

收稿日期:2020-01-21(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51808084);重庆市教委雏鹰计划研究项目(编号:CY180703);湖北文理学院博士科研基金资助项目(编号:2059047)

作者简介:王元元,男,博士,副教授.E-mail:wyy1005@seu.edu.cn

务,且铺装完成后 24 h 即可开放交通,表明 PPM 透水路面具有高效易用的特点。

尽管已有诸多将 PPM 用在透水人行道铺装中的实例,但这些研究并没有系统地考虑 PPM 透水人行道的结构设计,且多数研究主要偏重于聚氨酯混合料和沥青混合料之间的性能对比,却忽略了 PPM 铺装同透水砖铺装间的性能差异。因此,该文分别从人行道结构组成、力学性能和抗堵塞效果 3 个方面,对比分析 PPM 透水人行道铺装和透水砖人行道铺装间的异同,为更好地指导基于聚氨酯胶结料的透水人行道的设计、施工和应用等提供基础支撑。

1 透水人行道铺装的结构设计

行人荷载是人行道设计荷载的主要组成部分,而对于行人这种轻交通荷载的路面结构计算与分析并不是十分必要,因此绝大多数的人行道铺装结构设计都是以经验法为主。透水人行道铺装通常由路基、垫层(或路基增强层)、透水基层(也称透水结构层)和透水面层等几部分组成,各结构层具体情况见表 1。当考虑人行道停车需要时,仅需要在原有铺装结构上增加一层路基增强层即可。

表 1 透水人行道铺装各结构组成情况

结构层位	设置目的	材料组成	具体要求
透水 混合料 面层	胶结 保证雨水快速下渗,确定铺装结构耐久耐 候,提供人行道铺装所需的使用性能	OGFC、PPM 等	石子粒径不大于 5 mm,结构层厚度不低 于 4 cm,透水系数不小于 12 mm/s,抗弯 拉强度满足设计要求
		透水面砖	砌筑整齐、平顺,面砖厚度不低于 6 cm, 抗弯拉强度不低于 3.5 MPa
透水基层	提供均匀、可靠的支撑;在承受荷载的同 时还能够对透过水流进行过滤、储存,防 止储存雨水向路表层倒灌	级配砂砾、级配 砾石和级配碎石	石子最大粒径不超过 32 mm,厚度不小 20 cm,施工时应充分压实
路基增 强层	当人行道有停车需要时,进一步增强基层 的传荷能力	级配砾石或 级配碎石	石子粒径不大于 64 cm,结构层厚度不低 于 10 cm
垫层	改善人行道结构的温湿条件,防止冻胀的 发生	砂砾等松散 状材料	厚度通常不小于 15 cm
路基	承受荷载,也可储水、保水,维持水系平衡	素土地基	需平整、压实,其压实度不应低于 90%

如表 1 所示,根据透水面层类型的不同,透水人行道铺装可以分为胶结混合料铺装和透水砖铺装,其中胶结混合料铺装根据其胶结料的不同又可分为沥青类透水铺装和聚氨酯类透水铺装。考虑到沥青的强黏附性极易导致大孔隙沥青混合料铺装的堵塞,因此该文中所研究的胶结混合料铺装主要是指聚氨酯混合料透水人行道铺装。无论是聚氨酯混合料铺装还是透水砖铺装,其铺筑结构层以及除透水面层外各层所用的材料都大致相同,但效果却大不相同。对于聚氨酯混合料透水人行道的铺装,仅需要常温拌和,整体摊铺、抹平即可,机械化程度高,具有良好的整体性和突出的环保效益;而透水砖透水人行道的铺装则是由铺筑工人逐块砌筑,机械化程度低、耗时耗力且整体性差。特别是铺筑工艺控制不好时,极易出现面砖松动、破裂、雨天唧水等困扰。因此,聚氨酯混合料透水人行道铺装

的整体性好、结构稳定、铺筑效率高等优点是透水砖铺装无法比拟的。

根据排水方式的不同,聚氨酯透水人行道的结构又可分为无组织排水路面结构和有组织排水路面结构,见图 1。其中,无组织排水结构使雨水通过面层、基层直接渗入土基,能够及时补充城市地下水资源,改善水循环和生态条件。但这种结构由于雨水的浸入会影响到路基的稳定性,引发病害;而有组织排水结构则在保证土基免受雨水浸蚀的前提下,将雨水由透水基层底部排出,进入输水、弃流与截污等系统,蓄集利用。该结构虽然能够略微降低地表径流,减轻城市排水系统的负担,但对雨水的利用及生态条件的改善都极为有限,造成雨水资源部分流失。因此,在选择聚氨酯透水人行道排水方式时,应结合实际情况,因地制宜,综合使用两种排水结构,在保证路基稳定的前提下,最大

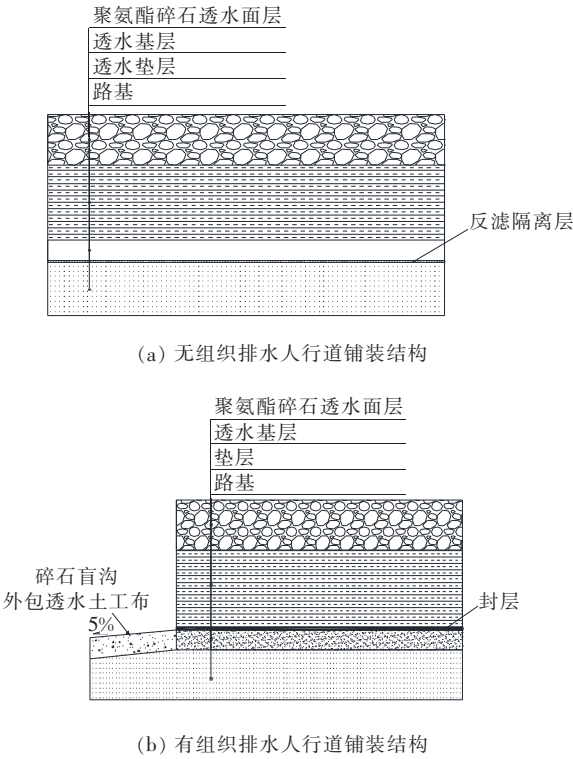


图 1 无组织排水和有组织排水两种人行道铺装结构对比示意图

限度地储水、保水,为城市的生态循环创造有利条件。

2 力学性能试验分析

人行道铺装透水砖的评价指标主要有:面砖厚度、抗压强度、抗折破坏荷载、透水系数和抗冻性等。相比之下,透水人行道铺装对聚氨酯混合料的要求要高出许多。首先需要确定合适的聚氨酯胶结料用量,然后绘制强度变化曲线,并抗压强度、抗折强度、透水系数、抗冻性、抗老化等性能指标进行检验。因此,该文主要以聚氨酯混合料为主,分析其力学性能,并同透水砖的性能指标相对比,以说明两者之间的异同。

2.1 最佳聚氨酯用量的确定

通常人行道铺装使用的聚氨酯混合料为单粒径碎石,因此选用粒径 3~5 mm 的玄武岩碎石、无溶剂双组分聚氨酯为原材料,通过试拌确定最佳聚氨酯用量。具体步骤如下:① 分两层每层插捣 50 次,后经人工整平成型马歇尔试件,在室温下养生 24 h 后进行肯塔堡飞散试验。将飞散试验旋转 125 r/m 且飞散量不大于 20% 的聚氨酯用量定义为最小聚氨酯用量(m_1);② 使用不同的胶结料用量,成型马歇尔试件,观察试件底部孔隙分布情况,将试件底部出现明显封孔现象时的

聚氨酯用量定义为最大聚氨酯用量(m_2);③ 参考水泥混凝土抗压和抗折强度试验方法,在 $m_1 \sim m_2$ 范围内取至少 5 组不同的聚氨酯用量分别制备边长 100 mm 的立方体和 150 mm×150 mm×550 mm 的棱柱体试件,测试其养生 24 h 后的抗压和抗折强度。取抗折强度大于 4.0 MPa 且抗压强度出现转折点的聚氨酯用量作为最佳聚氨酯用量(m_0)。按照以上步骤对所选原材料进行试验,结果见图 2,得到 m_1 为 3.5%, m_2 为 6.0%,最终得到 m_0 为 4.5%。

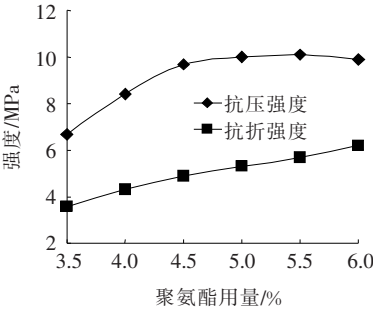


图 2 聚氨酯碎石强度随聚氨酯用量的变化曲线

2.2 聚氨酯混合料力学性能的检验

2.2.1 聚氨酯混合料强度变化曲线

确定最佳聚氨酯用量后,采用插捣加人工抹平的方式成型边长 100 mm 的立方体抗压强度试件,测试在不同养生时间和不同养生温度下,试验抗压强度的变化规律,测试结果见图 3。

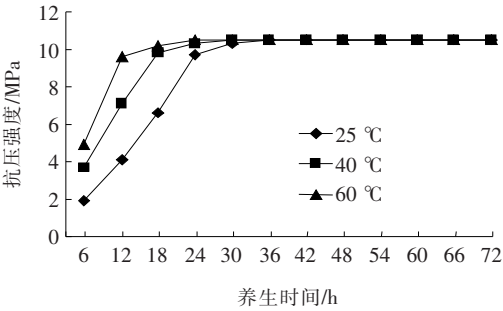


图 3 聚氨酯碎石强度随养生时间、温度的变化曲线

图 3 表明:聚氨酯混合料的强度随养生时间的增加而增长,且前期增长迅速,后期增长缓慢。在养生 24 h 后即可达到总强度的 95% 以上;此外随着养生温度的增加,聚氨酯反应速率加快,完全固化时间缩短,但当温度达到一定程度后,这种加速固化的效果被削弱。因此,后续试验中,将常温养生 24 h 确定为聚氨酯混合料的养生条件,既简化了试验操作又省去了不必要的加热,节约了养生时间。

2.2.2 聚氨酯混合料力学性能及同透水砖的对比

按照前文确定的聚氨酯最佳用量和养生条件,成

型聚氨酯混合料试件,测试其相关力学性能,并同透水砖相对比。对聚氨酯混合料而言,所测试的力学性能指标主要有:抗压强度、透水系数、冻融劈裂强度损失、抗老化强度损失率等;而对于透水砖,该文所选用的尺寸为 200 mm×100 mm×50 mm,长/厚=4(<5),依据 CJJ/T 188—2012《透水砖路面技术规程》无需测试其抗折强度。最终测试的力学性能指标有:抗压强度、透水系数和冻融循环强度损失率。其中,抗压、抗折强

度参考水泥混凝土试验方法;透水系数则依据达西定律参照 CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》完成测试;冻融劈裂强度损失参考水泥混凝土的抗冻性试验,分别在-18℃和20℃的条件下冻融循环,计算冻融前后的强度损失率;抗老化强度损失率参考 DBJ 41/T 150—2015《聚氨酯透水路面技术规程》,测试试件在历经氙灯光照前后的强度变化。具体测试依据及检测结果见表 2。

表 2 聚氨酯混合料同透水砖间力学性能的对比分析

性能指标	单位	聚氨酯混合料		透水砖		测试依据
		实测值	技术要求	实测值	技术要求	
抗压强度	MPa	9.7	≥6.0	38.5	≥30	T0553
抗折强度	MPa	4.9	≥4.0	—	长/厚≥5 时有要求	T0558
透水系数	cm/s	0.35	≥0.01	0.05	≥0.01	CJJ/T 135
冻融劈裂强度损失率	%	36.8	—	7.5	≤20	T0565
抗老化强度损失率	%	3.6	≤5.0	—	—	DBJ 41/T

由表 2 可知:透水砖的强度、抗冻性能明显优于聚氨酯混合料,其抗压强度约为聚氨酯混合料的 4 倍,冻融劈裂强度损失率仅为聚氨酯混合料的 20.4%。分析原因主要是聚氨酯混合料属于柔性材料,模量约为 5 000 MPa;而透水砖属于刚性材料,模量约为 30 000 MPa。虽然聚氨酯混合料的强度、模量不如透水砖,但良好的柔韧性使聚氨酯混合料的模量介于沥青混合料和水泥混凝土之间,赋予透水路面优异的抗疲劳特性。需要注意的是:① 聚氨酯属于有机高分子材料,使用前需检验其抗紫外光老化性能,试验结果表明该文所选用的聚氨酯满足抗老化性能的要求;② 冻融劈裂强度损失率并不能充分地反映透水路面的抗冻性能,透水路面的目的是让雨水向下渗透,将雨水储存在基层或土基,如果透水面层根本不存在滞留雨水,则面层结冰冻胀的概率将大大降低。而聚氨酯混合料的透水系数要高于透水砖一个数量级,其透水性能远优于透水砖。因此,在选择透水路面铺装材料时,应因地制宜,综合考虑材料的抗冻性能和透水性能。

3 抗堵塞效果评价

抗堵塞性能是决定透水路面能否保持持续渗透水的关键指标。研究表明,引起透水路面堵塞的灰尘的粒径主要集中在 0.15~0.3 mm 之间。因此该文将 1 000 g 自来水和 200 g 粒径 0.15~0.3 mm 的干燥黏

土搅拌均匀配置黏土悬浮液,然后采用黏土悬浮液对透水材料进行浇淋试验。对聚氨酯混合料和透水砖各浇淋 5 次,每次浇淋所用黏土悬浮液均为 1 200 g。浇淋结束后将试件放入 60℃烘箱中保温 6 h,保证试件充分干燥。按照式(1)计算浇淋前后试件的堵塞率,同时测试试件堵塞前后透水系数的变化情况,以综合评价透水铺装材料的抗堵塞效果。试件抗堵塞效果的综合评价结果见表 3。

$$S=\frac{m_1-m_0}{5\times 200}\times 100\%$$

(1)

式中:S 为试件堵塞率;S 越大表明试件抗堵塞性能越差; m_1 为浇淋试验干燥后试件的质量; m_0 为试件初始时的干质量。

表 3 聚氨酯混合料和透水砖抗堵塞性能的评价结果

透水材料分类	堵塞率/ %	透水系数/(cm·s ⁻¹)		透水系数 变化率/%
		堵塞前	堵塞后	
聚氨酯混合料	4.6	0.35	0.29	17.1
透水砖	19.7	0.05	0.02	60.0

表 3 的结果表明:相比之下,聚氨酯混合料具有更好的抗堵塞性能。在经 5 次浇淋试验后,其堵塞率仅为 4.6%,而透水砖的堵塞率却达到了 19.7%,比聚氨酯混合料高出近 4 倍;对透水系数而言,聚氨酯混合料在 5 次浇淋试验前后发生了 17.1%的变化,而透水砖的透水系数却改变了 60.0%。分析造成这一现象的

原因:① 聚氨酯材料固化以后的表面能非常低,约为 30 mJ/m^2 ,而透水砖材料的表面能为 80 mJ/m^2 左右,较低的表面能更有助于减少对污染物的吸附,降低堵塞现象的发生;② 聚氨酯混合料的空隙率通常在 30% 左右,高于透水砖的 18%,且聚氨酯混合料的空隙多为连通空隙,区别于透水砖中的空隙分布。

4 结 论

针对海绵城市建设中透水人行道铺装,分别从结构组成、力学性能和抗堵塞效果 3 个方面,对比分析了聚氨酯碎石和透水砖两种铺装形式的差异,得到以下结论:

(1) 聚氨酯混合料和透水砖两种铺装形式的路面结构大致相同,都包括:路基、垫层、透水基层和透水面层等结构层,不同之处在于透水面层材料的不同。相比之下,聚氨酯碎石透水人行道铺装具有节能环保、整体性好、结构稳定、铺装效率高等优点,这是透水砖人行道铺装所无法比拟的。此外,透水人行道铺装可分为有组织排水和无组织排水两种类型,实际应用中,应结合实际,在保证不影响路面结构稳定性前提下,综合利用两种排水方式,以实现最大限度地保水和储水。

(2) 通过肯塔堡飞散试验、底部孔隙分布观察试验及抗压、抗折强度试验,确定聚氨酯混合料最佳胶结料用量为 4.5%。并在此基础上测试了聚氨酯混合料的强度变化曲线,通过强度变化曲线确定了聚氨酯混合料的养生条件为常温养生 24 h。通过对比聚氨酯碎石和透水砖的力学性能,发现聚氨酯碎石属于柔性材料,具有较好的抗疲劳性能和透水性能,但其抗冻性能却略显不足。考虑到冻胀破坏取决于抗冻性能和透水性能两个方面,因此在冰冻地区的应用中,应综合考虑聚氨酯混合料的抗冻性能和透水性能两个方面,做到因地制宜,物尽其用。

(3) 无论是抗堵塞率还是渗透系数变化率都表明聚氨酯混合料具有更好的抗堵塞性能,主要是因为固化聚氨酯材料具有更低的表面能,以及聚氨酯混合料的空隙率偏高且多为连通孔隙。

(4) 对两种透水人行道铺装的结构组成、力学性能和抗堵塞效果进行了对比分析,取得了一定的研究成果,但仍然存在一些现实的挑战,如:透水人行道的

生态修复性能、保水调温效果和结构层黏结失效机理等,这些问题都需要在后续工作中展开系统的研究和分析。

参考文献:

- [1] 李洋洋,谢立炳,胡力群. 保水路面研究综述[J]. 中外公路,2017(1).
- [2] 程树斌,关彤军,张春会,等. 海绵城市道路种植土—碎石绿化带的雨水入渗[J]. 中外公路,2018(2).
- [3] 王火明,李汝凯,王秀,等. 多孔隙聚氨酯碎石混合料强度及路用性能[J]. 中国公路学报,2014(10).
- [4] Wang, D. W., Liu, P. F., Leng, Z., et al. Suitability of Porous Elastic Road Surface (PERS) for Urban Roads in Cold Regions: Mechanical and Functional Performance Assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 1 340—1 350.
- [5] Chen J, Yin X, Wang H, et al. Evaluation of Durability and Functional Performance of Porous Polyurethane Mixture in Porous Pavement[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188(3): 12—19.
- [6] Cong L, Wang T, Tan L, et al. Laboratory Evaluation on Performance of Porous Polyurethane Mixtures and OGFC[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 436—442.
- [7] Chen J, Ma X, Wang H, et al. Experimental Study on Anti-Icing and Deicing Performance of Polyurethane Concrete as Road Surface Layer[J]. Construction & Building Materials, 2018, 161: 598—605.
- [8] 邵洪涛,汪国平,李学东. 高透水生态路面的开发——聚氨酯碎石透水路面的工艺结构与性能[J]. 建设科技, 2013(19).
- [9] 李汝凯,王小明,王火明,等. 聚氨酯碎石透水路面板用量试验研究[J]. 公路工程,2015(2).
- [10] 徐周聪,王火明,李汝凯,等. 聚氨酯碎石混合料透路面施工工艺与质量控制[J]. 公路交通技术,2015(6).
- [11] CJJ/T 188—2012 透水砖路面技术规程[S].
- [12] Chen J, Li H, Huang X, et al. Permeability Loss of Open-Graded Friction Course Mixtures due to Deformation-Related and Particle-Related Clogging: Understanding from a Laboratory Investigation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(11).
- [13] 司红燕,商士斌,刘鹤,等. 接触角法测量马来海松酸改性双组分水性聚氨酯的表面能[J]. 林产化学与工业, 2016(2).