

基于海绵城市理念的城市道路透水人行道 结构分析与计算*

李明娟¹, 梅崇文²

(1. 嘉兴南洋职业技术学院, 浙江 嘉兴 314031; 2. 嘉兴市规划设计研究院有限公司, 浙江 嘉兴 314050)

摘要: 城市道路透水铺装是基于海绵城市理念的一种重要的源头控制技术, 能有效消除地表径流、减少洪峰流量、防治城市内涝、净化雨水实现水资源循环利用。文中通过比较分析几种透水人行道结构, 综合考虑土基回弹模量、荷载情况等设计指标, 提出了人行道结构设计及计算方法, 说明了透水材料的技术要求。

关键词: 公路; 海绵城市; 透水人行道; 结构设计

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)01-0088-04

近年来, 随着城市的发展, 内涝和面源污染成为困扰城市的通病。为适应全球环境变化和应对自然灾害, 嘉兴市率先开展“水专项”课题研究, 从源头缓解城市内涝、削减城市径流污染负荷、节约水资源、保护和改善城市生态环境。随着中央对海绵城市建设的高度重视, 嘉兴市成功跻身于第一批海绵城市建设试点城市, 并大力开展海绵城市建设。

1 透水铺装

透水铺装作为海绵城市源头控制中的重要技术措施, 广泛应用于人行道、广场、停车场及小区道路、市政道路的非机动车道等。透水铺装通过“渗、滞、蓄”等一系列过程实现水资源的循环利用。

透水铺装结构自上而下依次为面层、基层(含垫基层)和垫层, 由于面层材料和基层材料的不同及适用性的差异, 透水铺装结构及类型呈现多元化。根据面层材料类型, 透水铺装分为透水砖铺装、透水水泥砼和透水沥青砼铺装。根据基层材料类型, 透水铺装分为全透型和半透型, 考虑水荷载耦合作用下人行道受力情况, 全透型在使用性能和结构强度等方面优于半透型。该文仅对嘉兴市海绵城市建设中常用的全透型透水砖铺装结构和半透型透水砖铺装结构进行对比分析。

1.1 全透型透水铺装

全透型透水铺装是指基层具有透水性, 地表径流通过透水面层、透水基层渗入底层土直接进行地下水循环。嘉兴市大力推广海绵城市建设, 人行道、

广场及停车场大部分采用全透型透水人行道, 如范蠡湖公园、勺园停车场、中环南路、广益路、纺工路、长水路、富润路、富兴西路等。常用的全透型人行道结构(透水砖+透水基层)见图 1。

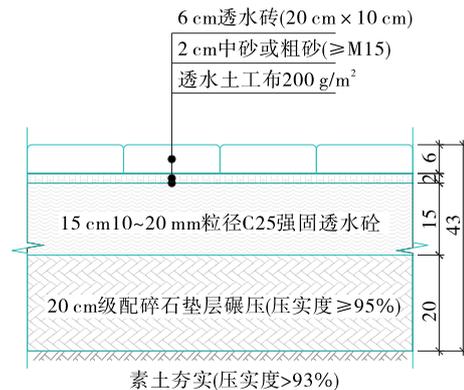


图 1 全透型透水铺装结构示意图(单位: cm)

1.2 半透型透水铺装

半透型透水铺装是指基层不具备透水功能, 地表径流透过面层后沿基层表面坡度进入市政雨水收集系统。如杭州上城区白石路人行道面层所采用的透水砼路面。常用的半透型人行道结构(透水砖+

* 基金项目: 浙江省嘉兴市 2014 年度科技计划项目(Z2014AY11030)

非透水基层)见图2。

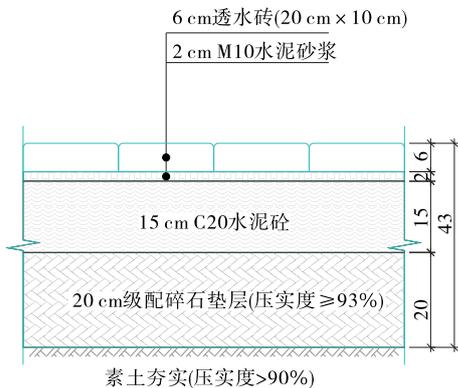


图2 半透型透水铺装结构(透水砖+非透水基层)示意图(单位:cm)

此外,兼顾人行道面层强度和基层的透水性,嘉兴市纺工路南段(海绵城市示范区以外)采用花岗岩面砖+透水基层的半透型透水结构,北京天安门广场透水砖铺装也为这种类型。半透型人行道结构(花岗岩面砖+透水基层)见图3。

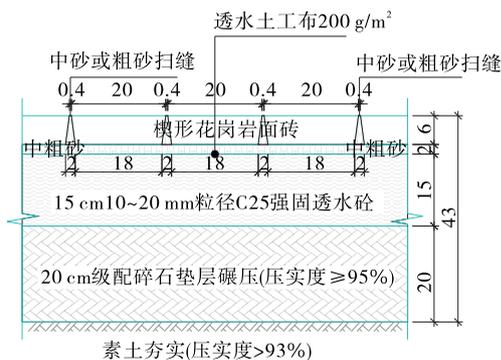


图3 半透型透水铺装结构(花岗岩面砖+透水基层)示意图(单位:cm)

1.3 透水铺装存在的问题

透水铺装使用寿命受多种因素影响,不仅取决于结构强度、耐久性,还与透水性能密切相关。道路设计使用年限内透水性能衰减,透水结构的透水性大小是决定透水铺装使用寿命的重要因素。随着透水铺装建设的不断深入,取得丰硕成果和成熟经验

的同时也出现一系列问题,主要表现为:

(1) 强度和透水性的矛盾。透水铺装结构强度和耐久性主要由水灰比和骨料决定,结构强度与透水性成反比。在实际工程中,提高承载力往往以降低透水性能为代价。在设计和施工中,在满足承载力要求、强度足够的基础上应尽可能提高结构的透水性能。

(2) 透水率的衰减。地表径流常含有固体污染物、有机污染物及重金属等,在透水结构孔隙中产生吸附和沉淀,极易导致通道孔隙堵塞,使透水率衰减,直至完全堵塞失去透水能力。尽管透水铺装定期采取打扫、清洗等管养措施,但结构内部堵塞无法清除,透水率衰减无法避免。

(3) 找平层脱空。透水铺装中找平层通常采用中砂、粗砂,透水砖面层与基层之间的粘结性无法保证,地表径流和透水铺装高压水枪的冲洗作用会导致找平层中砂或粗砂流失而不均匀,面砖出现翘曲、松动等病害。

(4) 级配碎石垫层过厚。嘉兴市区土基均为黏性土,且渗透能力较差,宜设置垫层。但为满足调蓄容积、储水量及控制率等海绵城市建设指标要求,级配碎石垫层设置较厚,成为透水铺装的储水层。储水量和储水深度对土基强度(含内侧车行道底部)产生较大影响。

(5) 路槽底部的土基回弹模量值较小,土基强度不满足设计要求。城市道路中人行道改造过程中受地下管线的影响,压实度无法满足设计要求,导致人行道运营一段时间后出现不同程度的病害。

(6) 技术标准或相应规范的缺失。目前透水人行道仅在CJJ/T 188—2012《透水砖路面技术规程》中有涉及,地方未出台相关透水人行道应用技术指南或规范指导和规范透水人行道设计、施工、质量检验及竣工验收。

2 透水人行道结构设计

透水人行道结构主要由透水面层、砂垫层、排水基层、碎石垫层及土基五部分构成,此外,设置盲沟(盲管)、渗沟、碎石沟、渗井、溢流井(溢水管)等LID设施用于人行道结构内部排水和渗水。

人行道面积占整个道路硬质铺装面积的20%以上,透水铺装无疑是城市道路中最重要的“海绵体”。结合嘉兴的气候条件、水文地质、交通情况等,考虑嘉兴土基渗透性较差等原因,因地制宜地选用

透水铺装各结构层材料。

(1) 透水砖。透水砖的技术指标主要有透水系数和抗压强度,要求其透水系数 $>1.0 \times 10^{-2}$ cm/s,防滑性能 ≥ 60 BPN,耐磨性 ≤ 35 mm,长/厚 ≤ 4 。这里仅根据人行道是否停车提出人行道透水砖强度等级参考值(见表1)。嘉兴市常用的透水砖规格为20 cm \times 10 cm,厚度建议取6 cm,主要材料涉及I类(陶瓷)透水砖和II类(预制)透水砖。透水系数根据设计要求选用A级($\geq 2.0 \times 10^{-2}$ cm/s)和B级($\geq 1.0 \times 10^{-2}$ cm/s)。透水砖的主要技术参数参照GB/T 25993—2010《透水路面砖和透水路面板》。目前,要同时满足抗压强度和渗透系数两项指标较为困难,实际设计时应结合市场材料供应情况合理选用路面材料。

表1 人行道透水砖强度参考值 MPa

人行道 荷载情况	抗压强度		抗折强度	
	平均值	单块最小值	平均值	单块最小值
有停车	≥ 50	≥ 42	≥ 6	≥ 5.0
无停车	≥ 40	≥ 35	≥ 5	≥ 4.2

(2) 找平层。采用中砂、粗砂或干硬性水泥砂浆,厚度宜为2~3 cm,且其透水系数应大于面层透水砖。嘉兴市透水铺装一般采用中砂或粗砂。

(3) 基层。根据基层是否具有透水性分为全透型和半透型两类,除满足一定强度外,应根据结构形式选用。全透型透水铺装透水基层在保证材料强度、透水性和稳定性的前提下,根据项目区域资源的实际选用透水粒料、透水水泥砼、水泥稳定碎石等基层。嘉兴全透型透水铺装基层通常采用透水水泥砼基层(10~20 mm 粒径 C25 强固透水砼),其主要技术指标为耐磨性(磨坑长度) ≤ 30 mm,透水系数(15 $^{\circ}$ C) $\geq 5.0 \times 10^{-2}$ cm/s,连续空隙率 $\geq 10\%$,抗压强度(28 d) ≥ 25 MPa,弯拉强度(28 d) ≥ 3.0 MPa。半透型透水铺装基层与普通硬化人行道基层一致,采用水泥砼基层(C20)。

(4) 嘉兴市区土基回弹模量较小,表层大部分为黏性土,人行道设计中应设置碎石垫层。全透型透水人行道,现状土基渗透能力较差,考虑透水性能和储水功能要求,垫层采用级配碎石,厚度为20~30 cm,如有特殊储水要求,可酌情增加垫层厚度。垫层内设置盲管(盲沟、集水沟)设施,提高排水基层的排(渗)水能力。半透型透水人行道垫层与普通

行道基层一致,采用级配碎石或碎石。

(5) 嘉兴地区的土基条件较差(强度低、含水量高),人行道结构应保证土基强度和压实度。土基压实度与回弹模量成正比,与土壤的渗透系数成反比,考虑嘉兴地区土壤的渗透系数较低,压实度的选用尽可能保证土基回弹模量满足设计施工要求。土基压实后表面应平整、无积水,不得出现“弹簧”、波浪、松散等现象,路槽底部土基回弹模量不宜小于20 MPa,特殊情况不宜小于15 MPa。透水人行道土质路基压实度标准按有停车和无停车两种标准选用,采用重型击实标准控制,不低于表2所示压实度。

表2 透水人行道土基压实度要求

填挖 类型	深度范 围/mm	压实度/%	
		有停车人行道	无停车人行道
填方	0~800	93	90
	>800	90	87
挖方	0~300	93	90

(6) 为减缓透水率衰减,透水铺装结构中透水基层顶铺设一层透水土工布,防止找平层的中粗砂流失而堵塞基层透水结构。此外,透水铺装应定期清洗,加强日常管养,防止污染物等堵塞通道。

3 透水人行道结构计算与分析

《城市道路工程设计规范》对人行道结构计算尚未涉及,目前国内外采用弹性层状体系理论对基层底面拉应力指标进行结构计算和分析。下面以常用全透型有停车透水人行道为例,介绍透水人行道结构计算方法。无停车透水人行道结构受力较为单一,在此不赘述。

3.1 计算参数的确定

人行道结构计算参数主要包括材料参数(含结构厚度、抗压回弹模量和泊松比)、荷载参数及验算指标。

(1) 材料参数。将人行道路面假设为各向同性的均质弹性层,用弹性模量 E 和泊松比 μ 表征其力学特性。半刚性基层和柔性基层的透水砖路面采用沥青路面设计方法,以设计弯沉值为路面整体强度设计指标并核算基层的弯拉应力,采用轴对称力学模型进行结构力学分析和位移计算。半刚性基层或柔性基层透水人行道各结构层材料设计参数见表3。刚性基层的透水路面采用水泥路面设计方法,有

停车透水人行道透水砖厚度不小于 8 cm,无停车透水人行道透水砖厚度不小于 4 cm。刚性基层透水

人行道各结构层材料设计参数见表 4。

(2) 荷载参数。《城市道路工程设计规范》未明

表 3 半刚性基层或柔性基层透水人行道各结构层材料设计参数

人行道结构	等效结构	厚度(等效厚度)/cm	抗压回弹模量/MPa	泊松比
透水砖	沥青层	6(7.75)	4 000	0.25
中砂、粗砂	找平层	2、3	90	0.35
透水性水稳基层	半刚性排水基层	15、20	1 500	0.15
级配碎石基层	柔性排水基层	15、20	250	0.30
级配碎石垫层	—	15、20、25、30	250	0.30
土基	—	—	5、10、15、20	0.35

表 4 刚性基层透水人行道各结构层材料设计参数

人行道结构	等效结构	厚度(等效厚度)/cm	抗压强度/MPa	弯拉强度/MPa
透水砖	水泥砼面层	6(3)	25、30	3.0、3.5
中砂、粗砂	找平层	2、3	—	—
透水砼基层	刚性基层	15、20	25、30	3.0、3.5
级配碎石垫层	—	15、20、25、30	—	—
土基	—	—	5、10、15、20	—

注:透水砖等效为水泥砼面层时选用小尺寸,为 10 cm×20 cm。

确人行道荷载标准,实际设计计算时可根据人行道是否停车进行选择。有停车人行道的荷载参数为汽车轴载 BZZ-40,机动车交通量不大于 200 veh/d;无停车人行道的荷载标准为 5 kN/m² 或 1.5 kN 竖向集中力作用在一块透水砖上。

(3) 验算指标。根据人行道结构各层路用材料和荷载的组合,不同结构形式采用不同的验算指标。半刚性基层和柔性基层的人行道,路表临界弯沉为 2 mm,基层层底允许拉应力的控制值为 1.0 MPa;刚性基层的人行道砼设计弯拉强度满足规范要求。

3.2 结构计算及结果分析

3.2.1 计算模型

选用嘉兴市常用的透水人行道结构,基层采用 10~20 mm 粒径 C25 强固透水砼,面层透水砖等效为水泥砼结构,拟定透水砖厚度为 6 cm,采用 2 cm 中砂或粗砂找平,并设置一定厚度的级配碎石垫层。按水泥砼路面设计方法进行设计计算,透水砖路面块体厚度 $h_t = h_s \beta$ (h_s 为水泥砼面层厚度),应选用的透水砖尺寸较小,为 20 cm×10 cm,人行道结构计算中 β 取 0.50。

因透水砖面层等效为水泥砼板,按规范要求,面

层和基层应视作分离式双层板进行应力分析。考虑到面层等效厚度仅为 3 cm,面层与基层设置找平层能有效实现面层与基层的粘结,将面层、找平层及基层假定为单层砼板进行结构计算。

3.2.2 结构计算

通过不同参数组合(1 t 人群荷载、4 t BZZ-40 和 10 t BZZ-100 3 种荷载条件,5、10、15、20 MPa 土基回弹模量),采用 URPSD-2012 中的 UCPD1 程序进行结构计算。等效后的水泥砼板厚度计算结果见表 5。

表 5 透水人行道最小等效厚度计算结果

土基回弹模量 E_0 /MPa	不同荷载下的最小等效厚度/cm		
	1 t 人群荷载	4 t BZZ-40	10 t BZZ-100
5~10	15	20~25	—
10~15	15	15~20	25~35
15~20	15	15	15~20

3.2.3 结构分析

由人行道结构计算可知,当透水砖尺寸规格及厚度选定后,人行道基层厚度主要由土基回弹模量

(下转第 103 页)

表 3 不同混合料小梁弯曲试验结果

混合料类型	灌浆饱满度/%	最大荷载/kN	抗弯拉强度/MPa	劲度模量/MPa	破坏弯拉应变/ $\mu\epsilon$
SBS-GRAC-13	97.1	1.29	10.66	3 910	2 441
70 [#] -GRAC-13	96.2	1.17	9.55	4 213	2 022
SBS-AC-13	—	1.09	8.90	3 415	2 957
SBS-GRAC-20	96.3	1.07	9.26	3 866	2 339
70 [#] -GRAC-20	96.7	1.03	8.70	3 920	2 010
SBS-AC-20	—	0.97	8.39	3 117	2 434

性沥青的灌入式复合路面混合料的低温性能略高于采用 70[#] 道路石油沥青的灌入式复合路面混合料。

4 结论

(1) 灌入式复合路面具有良好的水稳定性和高温稳定性,即抗水损、抗车辙性能较强,应用于交叉路口、货运通道等车辙严重的路段能起到较好的抗车辙效果。

(2) 灌入式复合路面的低温抗裂性能相对较弱,在冬季温度较低地区宜用于中、下面层。

(3) 基体沥青胶结料采用改性沥青能在一定程度上提高灌入式复合路面的低温抗裂性能。

参考文献:

[1] JTG E20-2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[2] 凌天清,董营营,夏伟,等.橡胶沥青灌入式半柔性路面的应用研究[J].公路,2009(2).

[3] 王鹏,李华.灌入式复合路面在交叉口路段养护工程中的应用[J].交通世界,2015(2).

[4] 杨宇亮,邹桂莲,张肖宁.半柔性混合料灌入式水泥胶浆的研究[J].公路,2002(6).

[5] 周启伟.灌入式保水性沥青混凝土抗车辙性能及机理分析[J].中外公路,2014,34(2).

[6] 张荣鹏.高性能灌注式半柔性路面材料的研究与应用[D].武汉:武汉理工大学,2009.

[7] 凌天清,周杰,赵之杰,等.灌入式半柔性路面用聚合物改性水泥砂浆的优选研究[J].公路交通科技,2009,23(5).

[8] 覃峰,李春.沥青混合料基灌注式半刚性路面抗腐性能研究[J].公路,2015(6).

收稿日期:2016-06-17

(上接第 91 页)

和荷载两个指标确定。常规的城市道路人行道设计要求土基回弹模量 E 。满足某一值,而实际人行道施工中通常未按设计要求测定人行道土基回弹模量,更不可能对人行道土基进行相应处理。根据表 5,人行道基层厚度选用与土基回弹模量关系紧密,如土基回弹模量达不到设计要求,但基层厚度却按拟定的土基回弹模量进行计算或经验值选用,将导致人行道在设计使用年限内出现破损,土基较差路段和设计时考虑无停车路段尤为严重。

4 结语

人行道结构计算及验收指标在城市道路设计相关规范中还没有依据,半刚性基层和柔性基层透水铺装可利用弹性层状理论体系进行计算分析,刚性基层透水铺装可按照水泥砼路面进行设计。根据对嘉兴市海绵城市建设中常用全透型透水人行道的结

构设计和计算,人行道设计中应综合考虑现场土基回弹模量、荷载情况合理选用人行道结构组合形式,确保人行道强度及透水性满足功能要求,提高人行道的使用寿命。

参考文献:

[1] 宋时良.攻克“全透型”透水人行道难关 主推杭州“海绵城市”建设[J].建筑工程技术与设计,2016(5).

[2] 臧金萍.天安门广场人行道改建工程中创新技术的应用[J].市政技术,2013(4).

[3] CJJ/T 188-2012,透水砖路面技术规程[S].

[4] GB/T 25993-2010,透水路面砖和透水路面板[S].

[5] CJJ/T 37-2012,城市道路工程设计规范[S].

[6] 2011JSCS-MR,城市道路工程设计技术措施[S].

[7] 陆津津.城市道路透水人行道结构设计[J].城市建设理论,2013(17).

收稿日期:2016-09-19