

海绵城市

透水砖应用于海绵城市建设的若干问题探讨

韦 甦^{1,2}, 吴力平³, 李 军⁴

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江省工程结构与防灾减灾技术研究中心重点实验室, 浙江 杭州 310014; 3. 杭州科技职业技术学院 城市建设学院, 浙江 杭州 310018; 4. 浙江工业大学 环境学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 从海绵城市建设的作用和目的出发,介绍了透水砖铺装的应用现状。阐述了透水砖铺装应用需系统考虑地形地貌、地下状况、与周边建(构)筑物和景观的协调情况等系列综合因素,以及结构类型确定的适用条件;从透水砖铺装透水机制入手,分析了满足渗水、蓄水要求的透水基层厚度核算公式;针对渗透系数较低的土基提出了能同时提高渗透速度和土基承载能力的小型砂石桩改进型透水铺装基层结构;对透水砖铺装使用期的维护和管理的重要性进行了分析,并介绍了常用的恢复透水砖透水能力的方法。

关键词: 透水砖; 海绵城市; 低影响开发(LID); 铺装

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)12-0001-05

Discussion on the Application of Water Permeable Brick in the Construction of Sponge City

WEI Su^{1,2}, WU Li-ping³, LI Jun⁴

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Disaster Prevention and Mitigation Technology, Hangzhou 310014, China; 3. Institute of Urban Construction, Hangzhou Polytechnic, Hangzhou 310018, China; 4. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The application of water permeable brick pavement was introduced on basis of water the sponge city construction. Before the application of water permeable brick, many factors should be considered, such as the topography, geological conditions, the situation of the underground, and the coordination with the surrounding buildings and landscape etc., which are closely related to the structure of the porous pavement system. Through the mechanism analysis of the porous pavement system, a formula is put forward to meet the base thickness for water storage requirements. An improved porous structure with small sand-gravel pile was recommended to improve the penetration speed and the subsoil bearing capacity. The importance of the water permeable brick maintenance in the service periods was analyzed, and several methods to restore the permeability of water permeable brick were introduced.

Key words: water permeable brick; sponge city; low impact development; pavement

透水砖铺装地面具有增强降雨入渗、减少地表 积水和径流、调节局地小气候等功能,近些年随着海

绵城市建设的推进,已广泛应用于公园、广场、停车场、人行道以及车流量和荷载较小的道路,如建筑与小区道路、市政道路的非机动车道等。目前透水砖的种类也越来越多,常见的有普通透水砖、聚合物纤维混凝土透水砖、彩石复合混凝土透水砖、彩石环氧通体透水砖、混凝土透水砖、生态砂基透水砖等。

但是,由于透水砖铺装的技术指标体系还不够系统成熟,不仅缺乏统一的设计方法,后期的维护管理也不够规范,致使其在设计、施工、维护中存在很大的随意性,实际效果难以达到“自然积存、自然渗透、自然净化”的最终目标。为此,对海绵城市建设的系统性、透水砖的透水机制、透水砖的后期管理维护等方面进行剖析,探讨了透水砖应用于海绵城市建设中的若干问题,以供参考借鉴。

1 系统适配性的评估

海绵城市建设的本质是将“山、水、林、田、湖”作为生命共同体和完整系统,通过转变城市规划建设理念、修复城市水生态,从而实现水环境改善、水资源承载能力提升、水安全保障能力加强等多重目标,不能就水谈水,更不能片面地强调雨洪利用、排水防涝等单一目标。由此可见,雨水的微循环和资源化利用只是海绵城市建设中的一部分。透水砖铺装能很好地补充地下水,对削减峰值流量、雨水的传输和净化能发挥较大的作用,从而有利于达到径流总量的控制目标。如果脱离了雨水微循环系统,或为了满足透水铺装率指标要求,透水砖铺装有可能成为不积水铺装,达不到海绵城市建设的初衷,因此是否选择透水砖铺装就有必要对应用场地的适配性进行评估。

评估首先要进行资料收集,包括拟建设区域的地质勘探资料、场地资料、气象资料和规划资料等。然后结合资料进行现场调研分析,其中地质资料要包括土体的渗透系数、土层结构、地下水位、土层厚度等内容;场地资料包括地形地貌、建(构)筑物分布、绿化环境等内容;气象资料主要包括反映当地降雨特征的资料,例如降雨强度、降雨历时、降雨峰值及其分布等;规划资料包括拟建区域的低影响开发控制目标、各单项指标要求及相关专项规划等。通过调研分析要解决“是不是适宜建”、“要建多少”和“建在哪里”等问题。土体的综合渗透系数和地下水位对其渗水和蓄水能力尤为关键,如果地下水位很高或土层厚度很小,则不宜选用透水铺装。第三

步进行方案设计,重点解决“怎么建”的问题。透水铺装通常可分为蓄水型和转输型两大类。蓄水型透水砖铺装是指渗透的雨水主要蓄存于透水基层和土壤基层的孔隙中,一般适用于土壤透水系数不小于 $1.0 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 且土基顶面距离地下水位不小于 1.0 m 的情况。当地下情况不满足上述条件时,则应采取土体改良、基层优化等技术措施或考虑选用转输型透水铺装。转输型透水铺装,即在透水基层下设置排水沟渠或排水管,将渗透的雨水转输到地下雨水涵道、地下雨水过滤砂床、滞留塘、下凹式绿地、雨水处理公园等配套的LID设施,而非排入传统的雨水管道。除了满足上述要求外,透水铺装还应与周边环境相协调,例如铺装材料、铺装颜色、铺装图案的选择。铺装材料有沥青、混凝土等材料,选择时要综合考虑功能、经济、环保等因素,一般车行道和停车场应选择透水混凝土基层和强度较高的铺装材料。铺装颜色要与建筑、绿化等周边环境综合考虑,有条件可选用高反射率和浅色铺装以利于缓解热岛效应。铺装图案有“一字型”、“花篮型”、“人字形”及其他组合形式,不同图案面层的相互力学作用也都不同,应根据铺装材料、使用环境、装饰效果等综合考虑。第四步进行方案评价,应从功能、经济、环保等角度多方位评价,确保方案可行且最优。

透水砖铺装的典型结构^[1]见图1。

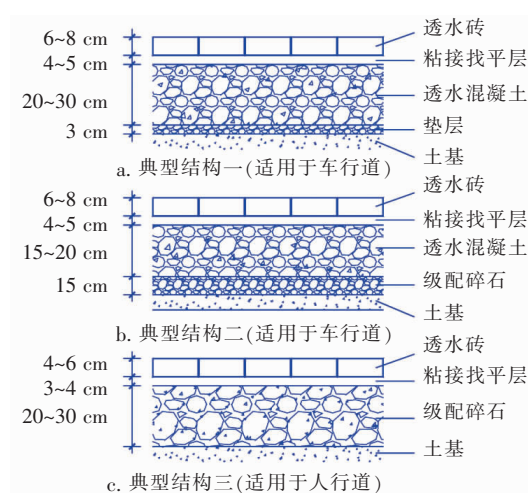


图1 透水砖铺装典型结构

Fig. 1 Typical pavement structure of water permeable brick

2 透水基层厚度的确定

透水砖铺装的结构设计应满足荷载强度和透水性两大基本要求,一般应先按强度进行设计计算,再进行透水、蓄水能力验算。国内目前关于透水砖的

设计和施工验收规范并不多,其中满足荷载强度的设计计算可以参照《城镇道路路面设计规范》(CJJ 169—2012)、《城市道路设计规范》(CJJ 37—2012)等标准规范进行,而透水、蓄水能力的验算目前还没有统一的方法。福建省地方标准《透水砖路面(地面)设计与施工技术规范》(DBJ 13—104—2008)主要从构造要求上对提高基层的渗水、蓄水能力提出了相应的规定。中国工程建设协会标准《砂基透水砖工程施工及验收规程》(CECS 244:2008)主要规定了透水砖铺装结构的组成,并对各基层的压实度、渗透系数和空隙率等技术指标提出了要求,对渗水、蓄水能力的设计没有相关规定。北京市地方标准《透水砖路面施工与验收规程》(DB 11/T 686—2009)规定了透水砖路面结构组成,对基层厚度的透水、蓄水能力计算也没有具体规定。2013 年 3 月 1 日开始实施的《透水砖路面技术规程》(CJJ/T 188—2012),参照日本 20 世纪 70 年代的《透水沥青路面》技术规定提出了透水砖铺装的基层厚度应按下式进行透水、蓄水能力验算:

$$H_a = (i - 36 \times 10^4) \frac{t}{v} \quad (1)$$

式中 H_a ——透水路面结构厚度(不包括垫层的厚度),mm

i ——地区设计降雨强度,mm/h

t ——降雨持续时间,s

v ——结构层的平均有效孔隙率,%

该公式不仅量纲不对,而且在应用中也存在一定问题。以蓄水型透水砖铺装为例,其透水过程如图 2 所示。

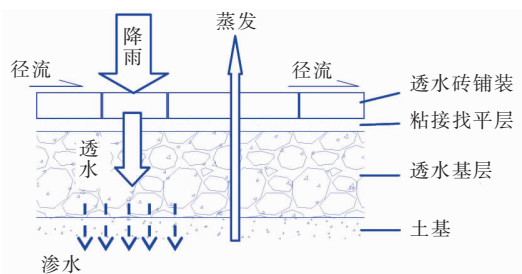


图 2 透水砖铺装透水过程示意图

Fig. 2 Permeation mechanism of permeable pavement

透水砖实际透水过程比较复杂,为了简化分析,现做如下假定:①各结构层厚度均匀,且在水平面上是各向均质的;②忽略各结构层间的坡度对水

分垂向渗透运动的影响;③铺装面层仅作为透水材料,而不考虑其保水性;④将基层作为主要的储水结构,土基作为具有一定渗透能力的自然土壤,并不考虑土体毛细水的影响;⑤地下水位线远低于基层底面,在降雨过程中透水砖的蒸发量忽略不计。

根据张书函等^[2]的试验结果,透水砖的透水系数符合现有规范要求,即在渗透系数不小于 1.0×10^{-2} cm/s 的情况下,面层能承受 5 年一遇的降雨不积水。考虑到透水性能随时间的衰减,《透水砖路面技术规程》(CJJ/T 188—2012)规定透水砖路面的设计应满足 2 年一遇的暴雨强度下持续降雨 60 min,表面不产生径流。即在不考虑铺装范围外汇入的地表径流,正常使用时透水砖表面径流为零。因此,在降雨过程中,单位面积透水砖铺装上的降雨全部渗透到基层及土壤中。由于找平层、基层的渗透系数远大于透水砖面层,且土基的渗透系数一般小于透水砖[细砂的透水系数一般为 $(1 \sim 6) \times 10^{-3}$ cm/s],所以渗透的雨水逐渐将基层的空隙灌满。按照上述分析,以路面不积水为原则,即在降雨历时过程中,透水砖铺装最大渗透量等于基层空隙中的水和渗入土基的水之和。可推导出如下公式,并按该式进行透水砖铺装基层的透水、蓄水能力验算:

$$H_{基} = (i - 3.6 \times 10^4 k_{\pm}) \frac{t}{v} \quad (2)$$

式中 $H_{基}$ ——透水路面结构厚度(不包括透水砖面层厚度),mm

i ——设计降雨强度,mm/h

k_{\pm} ——土基的平均渗透系数,cm/s

t ——降雨持续时间(一般按 2 h 计),h

v ——结构层(基层)的平均空隙率,%

日本国土交通部 2016 年颁布的规范也采用了该公式对透水铺装基层厚度的蓄水能力进行核算。当按式(2)计算透水、蓄水能力不满足要求时,可考虑增加透水路面结构厚度 $H_{基}$ 或土基的平均渗透系数 k_{\pm} 或结构层(基层)的平均空隙率 v 。结构层(基层)的平均空隙率与结构的强度有一定关系,需综合考虑。采取上述措施仍无法满足要求时,则应考虑选用转输型透水铺装。

3 砂石桩提高透水砖铺装蓄水能力的探讨

采用蓄水性透水砖铺装,随着土体含水量的增加,土基的强度将降低,有可能会造成路面不均匀下沉甚至开裂坍塌。当土体渗透系数很小或土体改良

代价太高而选用运输型透水砖铺装时需通过铺设在基层里的管、渠将雨水传输到其他 LID 设施中,会大幅增加建设成本,同时也会增加施工难度。由式(2)可知,透水路面的结构厚度 $H_{\text{基}}$ 或土基的平均渗透系数 k_{\pm} 对透水砖铺装的透水、蓄水能力有一定影响。为此针对渗透系数较小的软塑性粘土,提出一种采用小型砂石桩来提高透水砖铺装蓄水能力,同时改善土基承载力的方法,其原理见图 3。

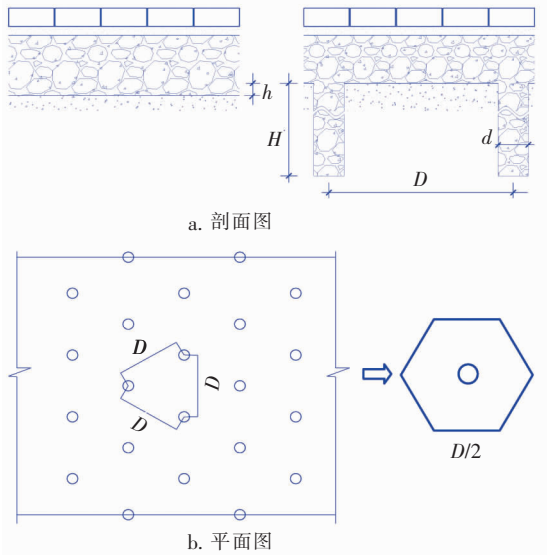


图3 透水砖铺装砂石桩基层示意图

Fig. 3 Sand-gravel piles bedding of permeable pavement

如图3所示,设砂石桩正三角形布置,直径为 d ,桩间距为 D ,桩长为 H ,则每根砂石桩分摊的平面面积是边长为 $D/2$ 的正六边形面积,其面积 S 为:

$$S = 6 \times \frac{1}{2} \times \frac{D}{2} \times \frac{D}{2} \times \sin 60^\circ = \frac{3\sqrt{3}}{8} D^2 \quad (3)$$

在满足强度要求下,假定基层厚度比原厚度减少 h ,减少部分的级配砂砾用于砂石桩成桩,则根据前后体积相等,即:

$$S \times h = \frac{\pi d^2}{4} H \quad (4)$$

可得:

$$H = \frac{4Sh}{\pi d^2} = \frac{4h}{\pi d^2} \times \frac{3\sqrt{3}}{8} D^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \left(\frac{D}{d}\right)^2 h \quad (5)$$

由此可计算设置砂石桩后雨水与土基的渗透接触面积的提高率 M 为:

$$M = \frac{\pi d H}{S} = \pi d \times \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \left(\frac{D}{d}\right)^2 h \times \frac{8}{3\sqrt{3} D^2} = 4 \frac{h}{d} \quad (6)$$

根据式(6)可知,当基层减少厚度 h 为定值时,接触面积的提高率 M 与桩的直径 d 成反比,因此应尽可能选择小直径的桩体。为了充分利用砂石桩的蓄水、透水效果,桩长 H 应根据地下水位离基层底的高度来确定。 D/d 为桩距比,反映了桩的疏密程度,应以不破坏土体结构为原则,根据实际经验一般不宜小于 2。

现假设某拟建场地地下水位距基底 1.5 m (即桩长 H 为 1.5 m),桩直径 d 为 10 cm,需将土基的渗透接触面积提高 2 倍,即 M 为 200%,则根据式(6)算得 h 为 0.05 m。将 H 、 h 、 d 代入式(5)可得 D 为 0.6 m。

根据达西定律,水在单位时间内通过多孔介质的渗流量与渗流路径长度成反比,与过水断面面积和总水头损失成正比,其表达式如下:

$$Q_{\text{渗}} = k_{\pm} A \frac{h_w}{L} \quad (7)$$

式中 $Q_{\text{渗}}$ ——渗流流量

k_{\pm} ——土基的平均渗透系数

h_w ——总水头损失

A ——过水断面面积

L ——渗透路径长度

设置砂石桩后,根据前述估算结果,过水面积 A 大大增加,桩侧周围和桩底土体渗透路径 L 也有所缩短,作用在桩侧和桩底的水头压力也有所提高,由此可见,采用砂石桩后虽然基层厚度稍有降低,但土体的综合渗流流速必将显著提高,这与式(2)也是一致的。

另一方面,根据复合地基加固机理,在土基中设置砂石桩后,密实的碎石、砂取代了与桩体体积相同的低模量、低强度土体,在承受外荷载时,地基中应力按桩土应力比重新分配,应力向桩体逐渐集中,桩周土体所承受的压力相应减小。由于砂石桩的强度和抗变形能力均优于土体,故成形后的复合地基承载力、模量也优于原土体,从而有利于减小地基变形并提高土体的承载力^[3]。

现场施工时,首先进行测量放线确定桩体位置,然后选用镐头机、液压打桩车或其他小型机械挤压成孔,随后可通过人工将按一定比例预先拌和均匀的砂石材料灌入孔内并充填密实。为了保证施工质量,施工中应重点控制桩长、灌砂量、砂石级配,必要时应考虑采用复打工艺。

4 透水能力的保护与恢复

由于透水铺装面层的孔隙率通常都小于基层的空隙率,且孔隙也小于基层的空隙,所以面层堵塞对整体的透水能力影响较大。在建设过程中,根据浙江嘉兴、衢州、金华等地的经验,建议透水砖生产厂家在产品出厂时,对透水砖成品进行面层覆盖保护,并将面层施工安排在最后,待灌缝及表面清理结束后,再去掉保护膜(纸),以免施工过程中造成铺装面层堵塞。

根据张文静等^[4]的试验结果,透水铺装的渗透效果随着使用期限的加长而有所减弱,在使用2年后面层瞬时下渗速率变化明显,地表积水现象增加严重,积水时间提早,与初铺设时相比渗透效果减弱较多。其减弱的原因主要有两方面:一是下垫层密度随着上部作用时间延长而变大,导致垫层透水系数减小;二是由于灰尘、垃圾等杂质在透水砖面上的长期堆积堵塞了透水砖表面的孔隙,影响了透水砖的雨水瞬时下渗速度。在实际应用过程中,“重建设、轻管理”的现象时有发生,因此针对第二种原因,作者根据资料汇总了一些恢复透水铺装良好透水性能简单而有效的措施。按照美国的管理经验,用真空吸尘器对透水砖铺装表层孔隙清扫至少4次/a,其恢复效果比较理想而且管理成本与传统铺装相当。有研究者对透水砖(使用5年)进行了高压冲洗试验,利用冲洗前后的渗透系数来评判其渗透能力的恢复情况,结果表明该方法能较好地恢复透水砖的渗透能力。除此之外,压力吹扫也是一种行之有效的方法。随着使用时间的进一步延长,上述方法的恢复效果会越来越不明显,这时还可以通过在透水砖上每隔一定距离打小直径(对透水砖的强度影响不大)的孔进行补救。

5 结语

透水砖铺装作为海绵城市建设中一项重要的LID设施,可以有效降低城市内涝风险,缓解城市水资源紧张状况和热岛效应等生态问题,对进一步控制径流总量的作用也十分明显。但是,如果不考虑透水砖应用的综合条件,例如土基渗透性极低、周边

没有雨水转输及综合处理、利用的配套LID设施,那么透水砖的综合作用将大打折扣。选择合理的透水砖铺装类型对充分发挥透水砖的作用也十分重要,在设计过程中,除了要满足荷载强度要求外,对基层的渗水、蓄水能力还要进行正确的核算。在透水性较差的土基中通过砂石桩结构可显著加快土基的渗水速度,同时提高土基的承载能力。在使用过程中,还要避免“重建设、轻管理”的现象,科学化、制度化、规范化的管理维护不仅是透水砖铺装正常发挥作用和延长使用寿命的需要,也是海绵城市建设的内在要求。

参考文献:

- [1] 楼跃丰,陶亚强,何迪华,等. 砂基透水砖在海绵城市建设中的应用[J]. 砖瓦,2015,(11):31-33.
- [2] 张书函,陈建刚,赵飞,等. 透水砖铺装地面的技术指标和设计方法分析[J]. 中国给水排水,2011,27(22):15-17.
- [3] 何广讷. 振冲碎石桩复合地基(第2版)[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [4] 张文静,丁跃元,张书函. 混凝土透水砖透水持久性的研究[J]. 新型建筑材料,2006,(6):22-24.



作者简介:韦甦(1975-),男,浙江桐庐人,硕士,高级工程师,主要研究方向为污水的生态处理与资源化利用。

E-mail: weisu75@zjut.edu.cn

收稿日期:2016-10-24