

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201806015



复合结构生态透水砖设计及性能分析

王海峰, 郭钟瀚

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以水泥细石透水混凝土为基层材料、树脂砂基混合料为面层材料,制备复合结构生态透水砖 (EPBCS). 通过分析树脂、水泥、有机物 X 及石英粉对复合结构砂基透水砖的抗折强度、抗压强度,以及透水系数的影响规律,确定透水砖的基本结构和组分,并对其透水机理进行分析. 研究表明:掺入 4% 石英粉作为矿物外掺料,可以在保证树脂砂基混合料强度的基础上有效改善材料的透水性能;当树脂掺量为 3%~5% 时,有利于面层砂基混合料力学性能的改善;当树脂掺量为 5%,石英粉掺量为 4%,以及体积分数 10% 的有机物 X 掺量为 2%,基层透水混凝土的主要组分掺量为细石:水泥:水=3.0:0.8:0.3 时,复合结构生态透水砖的抗压强度高于 25.0 MPa,且透水系数均高于 $2.3 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,满足相关规范对一般透水砖的性能要求.

关键词: 生态透水砖; 树脂; 复合结构; 透水系数

中图分类号: TU 502 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)02-0164-08

Design and Performance of Ecological Permeable Brick With Composite Structure

WANG Haifeng, GUO Zhonghan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Taking cement pervious concrete with fine stone as base material, and resin-sand mixture as surface material, these two kinds of materials were used to prepare the ecological permeable brick with composite structure (EPBCS). The basic structure and composition of EPBCS were designed by analyzing the effect of resin, cement, organic-X and quartz powder on the flexural strength, compressive strength and permeability coefficient of EPBCS; and the permeability mechanism was studied. It is shown that: on the basis of guaranteeing the basic mechanical properties, adding 4% quartz powder improves effectively the water permeability of resin-sand mixture; adding 3%-5% resin improves the mechanical properties of resin-sand mixture. Adding 5% resin, 4% quartz powder, 2% organic-X with 10% concentration, and ratio of the main components of base permeable concrete is that fine stone : cement : water = 3.0 : 0.8 : 0.3, the compressive strength of all the specimens of EPBCS exceeds 25.0 MPa, and the permeability coefficients are higher than $2.3 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, which meets the requirements of relevant specifications.

Keywords: ecological permeable brick; resin; composite structure; permeability coefficient

透水砖作为一种新型的道路铺装材料,具有较高的孔隙率和较好的透水性,能够对地下水进行补给,减小地基下沉,缓解城市抗洪排涝系统的压力;同时,地下水可通过透水砖孔洞蒸发,减少城市地面热能吸收和“热岛效应”,对降低城市噪声污染也有积极作用,很大程度上克服了传统阻水型地面铺装材

收稿日期: 2018-06-06

通信作者: 王海峰(1980-),男,讲师,博士,主要从事绿色环保建材、功能型土木工程材料和建筑材料资源化再生利用的研究. E-mail: wanghaifengdoc@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金面上资助项目(2016J01241)

料的缺陷^[1-3]. 为解决因过度抽取地下水而造成地基下沉的问题, 日本推行“雨水渗透计划”, 将研发的透水性沥青混凝土铺装材料和透水性混凝土铺装材料应用于公园广场、停车场、运动场等城市道路. 据统计, 东京使用透水路面铺装材料后, 城市对雨水资源的有效保持量从 48.2% 增长到 94.6%^[4-6]. 20 世纪 80 年代, 日本投放市场的 INAX 陶瓷透水砖也产生了良好的社会效益^[7-10]. 目前, 国内对透水砖的研究主要集中在性能方面. 文献[11-14]利用碱激发体系及建筑垃圾固废利用等体系研究透水砖, 获得较好的力学性能和透水性能. 传统透水砖主要通过设计大孔洞和高孔隙率的铺装材料实现快速透水的功能^[15-17]. 但是, 这种结构的透水砖在实际使用过程中常因孔洞太大而容易堵塞, 且难以疏通, 造成地表积水, 难以发挥透水砖应有的性能. 针对上述问题, 本文以普通砂和细石分别作为透水砖的面层和基层骨料, 以树脂和水泥基作为胶凝材料, 设计一种复合结构生态透水砖 (EPBCS), 研究胶凝材料用量、矿物外掺料用量及透水系数等因素之间的相互影响规律, 并对设计方案进行优化.

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

研究用的细集料为沿海城市易取的普通海砂, 过筛, 选用粒径范围 0.15~0.60 mm 的砂料作为面层骨料; 基层透水混凝土骨料为细石, 粒径为 2.5~7.0 mm; 树脂固化剂采用低粘度环氧树脂和固化剂; 试验用水泥为 P. O 42.5 水泥; 天然石英粉通过 120 目筛子过筛. 低粘度环氧树脂主要参数: 密度为 1.13~1.17 g·cm⁻³; 粘度为 700~1 100 mPa·s; 摩尔浓度为 166~185 g·mol⁻¹; 环氧值 0.54~0.60 mol·g⁻¹; 耐火指数为 1 548~1 552. 固化剂参数: 密度为 0.93~0.98 g·cm⁻³; 粘度为 10~50 mPa·s; 胺值 (中和 1 g 碱性胺所需要氢氧化钾的质量) 为 400~600 mg·g⁻¹; 耐火指数值为 1 460~1 463.

1.2 树脂砂基面层材料的制备

透水通道易堵塞、难清理等问题缩短了大多数传统透水砖的使用寿命. 为克服这个缺陷, 设计的 EPBCS 以树脂砂基混合料作为面层材料, 通过化学改性的方法从分子尺度实现面层树脂砂基混合料的透水功能. 由于透水砖为路面铺装材料, 实际使用过程中多以压力为外载荷, 因此, 将抗压强度和透水性作为材料性能研究的首要性能指标, 将抗折强度作为辅助评价指标.

将经过筛分的海砂分为两组: 一组为 A (0.15 mm < Φ < 0.60 mm); 另一组为 B (Φ ≤ 0.60 mm). 两组砂料中分别加入适量的石英粉, 石英粉的掺量 (质量分数) 拟定为 0%, 2%, 4%, 6%, 8%. 利用可调速搅拌机将掺入石英粉的砂料均匀混合并持续搅拌, 然后, 将低粘度环氧树脂和固化剂按比例充分混合后, 匀速加入搅拌机中搅拌 3~5 min, 直至树脂、砂子及石英粉之间形成良好的裹覆. 混合好的材料取出装入模具内, 高频低幅震压 15~30 s 后成型, 作为面层透水砖待用. 震压后的材料作为 EPBCS 的面层材料, 参考贺图升等^[18]的研究方法, 自制简单实用的装置, 对树脂砂基混合料的透水系数进行测试, 实验仪器如图 1 所示.

透水系数的计算式为

$$K_{\theta} = \frac{QL}{AHt}. \tag{1}$$

式(1)中: K_{θ} 为水温 θ °C 时材料的透水系数 (cm·s⁻¹); Q 为时间 t 内的渗水量 (mL); L 为式样厚度 (cm); A 为式样的上表面面积 (cm²); H 为固定水位差 (cm); t 为渗透时间 (s).

1.3 基层透水混凝土及复合结构生态透水砖的设计

双层透水砖的下层部分以水泥基作为基本胶凝材料, 对筛分好的细石 (粒径为 2.5~7.0 mm) 进行固化处理, 制成混凝土透水层. EPBCS 的基本结构件, 如图 2 所示. 混凝土透水层材料 (细石: 水泥: 水) 的拟定配比分别为 3.0: 1.0: 0.5, 3.0: 1.0: 0.3, 3.0: 0.8: 0.3, 3.0: 0.6: 0.2.

制作双层透水砖时, 上、下层材料的体积比约为 1: 3 (图 2). 首先, 将下层混凝土透水层搅拌均匀后

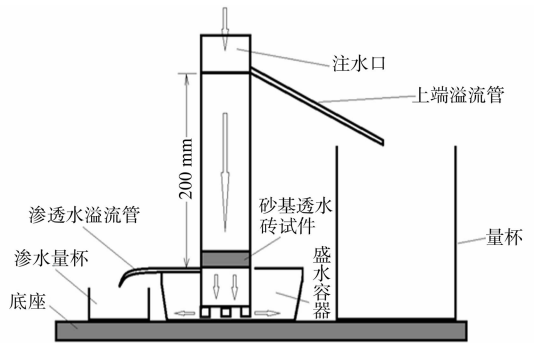


图 1 透水系数实验仪器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental instrument for permeability coefficient

装入模具 3/4 处;然后,把树脂固化的砂浆装入模具剩余的 1/4 容积内,将模具填满;最后,通过微型振动器震实并完成试件成型。

根据 JG/T 376—2012《砂基透水砖》的要求,砂基透水砖面层的抗压强度应不小于 25.0 MPa;透水速率大于等于 $1.5\text{ mL}\cdot(\text{min}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$;当透水砖长/厚 ≥ 5 时,抗折强度不小于 2.4 MPa,当长/厚 < 5 时,抗折强度不做要求。根据 DBJ 13-104—2008《透水砖路面(地面)设计与施工技术规范》(以下简称《规范》)对路面砖强度的规定,透水路面砖的抗压强度不低于 25.0 MPa,透水系数不低于 $1.0\times 10^{-2}\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。为方便实验和计算,文中设计的 EPBCS 的透水性能以《规范》对砂基透水砖的要求为参照。

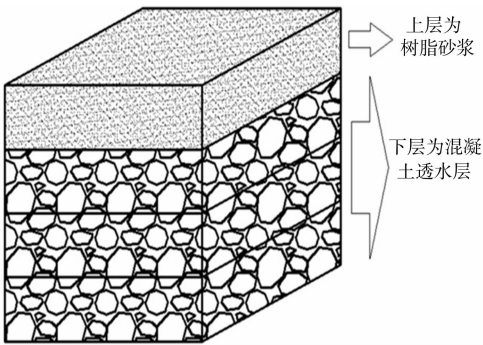


图 2 EPBCS 的结构特征
Fig. 2 Properties of EPBCS structure

2 试验结果及分析

2.1 树脂和石英粉对砂基混合料基本性能的影响

拟定树脂掺量(质量分数, $w(\text{树脂})$)为 $0\% \sim 14\%$,考察砂基混合料的抗压强度(f_c)和透水系数(K),如图 3 所示。由图 3 可知:增加树脂掺量可有效提高砂基混合料的抗压性能,但却降低了其透水性能;当树脂掺量为 $1\% \sim 2\%$ 时,随着树脂掺量的增加,树脂砂基混合料的透水性能呈明显的降低趋势;当树脂掺量超过 2% 后,砂基混合料均不具备透水性能。因此,在确保基本抗压强度的基础上,提高混合

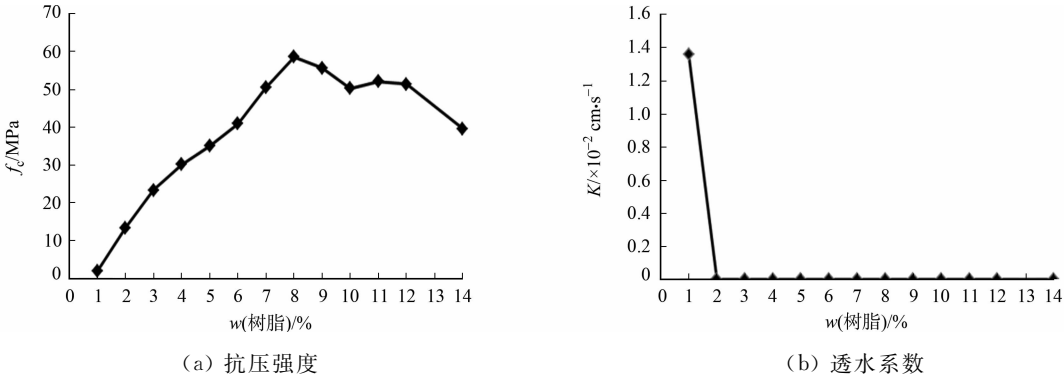


图 3 树脂掺量对树脂砂基混合料抗压强度和透水系数的影响(无有机物 X)
Fig. 3 Effect of resin on compressive strength and permeability coefficient of resin-sand mixture (without organic matter X)

料的透水性能是改善砂基透水砖性能的关键。

树脂类固化剂在砂粒的外表面形成一层裹覆将砂子粘结在一起,随着树脂的固化,混合料产生强度,由于固化剂具有明显的憎水性,且砂粒粒径都较小,因此,砂粒之间有限的空隙很容易被树脂填充,从而导致混合料整体透水性较差甚至不透水^[19-22]。为改善砂粒之间的结构分布,将石英粉作为矿物外掺料加入树脂砂基混合料中,调整树脂与砂粒之间的有效空隙率,提高砂基混合料的透水性能^[23-25]。拟定树脂掺量为 $1\%, 3\%, 5\%, 7\%, 9\%$, 与之对应的石英粉掺量分别为 $0\%, 1\%, 3\%, 5\%, 7\%$, 分别测试砂基混合料的抗压强度和透水系数,结果如图 4 所示。

由图 4 可知:当树脂掺量为 $1\% \sim 7\%$, 对应石英粉掺量为 $0\% \sim 5\%$ 时,随着树脂和石英粉掺量的增大,砂

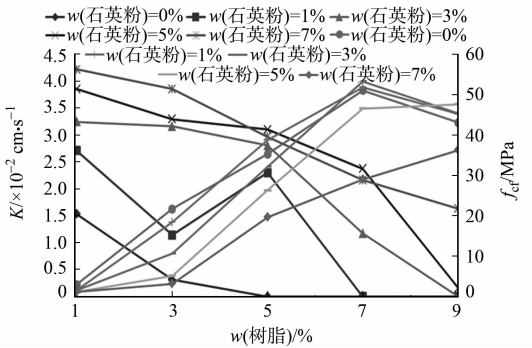


图 4 石英粉和树脂掺量对砂基混合料透水性和抗压强度的影响
Fig. 4 Effect of resin and quartz powder on compressive strength and permeability coefficient of resin-sand mixture

基混合料的抗压强度呈连续增大的趋势;当树脂掺量大于 7%时,抗压强度随之降低;随着石英粉和树脂掺量的继续增大,砂基混合料的透水系数均表现出逐渐降低的趋势;透水系数曲线与抗压强度曲线的交集为该体系中树脂和石英粉的最优掺量,即树脂掺量为 4%~6%时对应的组分。

在实验过程中,当树脂和石英粉掺量为 6%时,粘膜现象较严重,给实际生产操作带来一定的困难。因此,拟定石英粉的掺量为 4%,树脂掺量为 1%~8%,该体系中树脂掺量对树脂砂基混合料抗压强度和透水性能的影响,如图 5 所示。

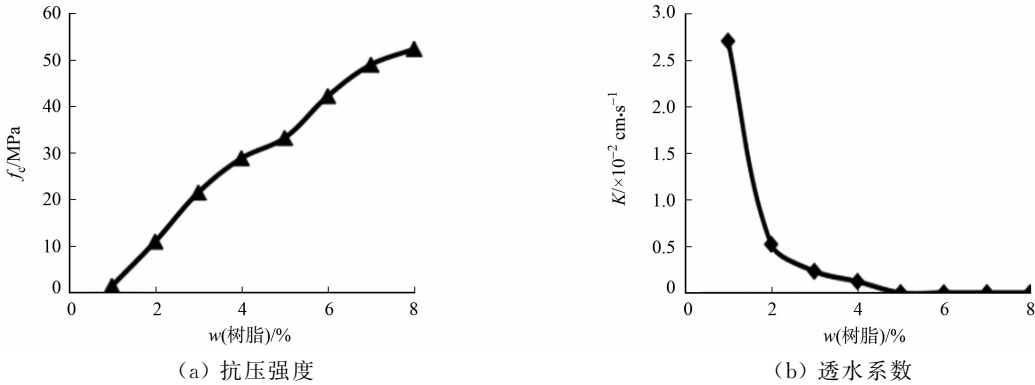


图 5 树脂对砂基混合料性能影响(不掺有机物 X)

图 5 Effect of resin on the performance of resin-sand mixture (without organic matter X)

由图 5 可知:掺入 4%石英粉能够有效改善砂基混合料的透水性能,当树脂掺量为 0%~4%时,砂基混合料试件均具有一定的透水性,但抗压强度低于 30 MPa;而当树脂掺量高于 5%时,抗压强度均高于 30 MPa,但混合料几乎失去透水性,需做进一步调整。

2.2 有机物 X 对砂基混合料性能的影响

树脂虽然可以对砂料实现较好的固化效果,但因其典型的憎水性,固化后单一组分的树脂砂基混合料几乎不具有透水性能。因此,选择增加有机物 X 作为混合料透水性能的调控组分。该有机物 X 主要应用于印染领域,参考体积分数为 2%~10%,考虑到透水砂基混合料体系的特殊性,结合前期初试工作,认为有机物 X 体积分数为 10%对混合料透水性能的改善最好。当体积分数为 10%的有机物 X 掺量为 3%时,树脂砂基混合料的透水性能完全满足设计需求。考虑到有机物 X 可能对树脂材料的固化产生不良影响,拟定体积分数 10%的有机物 X 的掺量为 0%~2%,树脂掺量为 3%~6%,石英粉掺量为 4%,测得砂基混合料的透水系数,如表 1 所示。表 1 中: w 为质量分数。

表 1 有机物 X 对树脂砂基混合料透水系数的影响

Tab. 1 Effect of organic materials-X

$w(\text{树脂})/\%$	on resin-sand mixture $10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$				
	$w(\text{有机物 X})/\%$				
	0	0.5	1.0	1.5	2.0
3	0.14	0.26	1.25	2.77	3.10
4	0	0.11	1.33	2.17	2.90
5	0	0	0.85	1.62	2.60
6	0	0	0.10	1.45	2.01

由表 1 可知:当石英粉掺量为 4%时,树脂砂基混合料的透水性随有机物 X 掺量的增大,表现出持续增强的趋势;当有机物 X 掺量一定时,随着树脂掺量的增大,树脂砂基混合料的透水性逐渐降低;有机物 X 的添加并未对树脂砂基混合料的抗压强度产生明显的不良影响。

综合上述的实验结果,拟定砂基混合料中有机物 X 的掺量为 2%,树脂掺量为 5%,石英粉掺量为 0%~8%,砂基混合料的抗压强度和透水性能,如图 6 所示。

由图 6 可知:随着石英粉掺量从 0%增加到 8%,树脂砂基混合料的透水系数从 $1.8 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $3.1 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;当石英粉掺量为 0%~2%时,试件的抗压强度随着石英粉掺量的增加,从 1.58 MPa 上升至 12.35 MPa,在此过程中,试件抗压强度增长相对较缓慢;当石英粉添加量从 2%增加至 4%时,试件的抗压强度从 12.35 MPa 增加到 38.78 MPa,且该过程中强度增长的速率较大;当石英粉的掺量大于 4%后,试件的抗压强度出现急剧下降的趋势。

综合上述研究结果,拟定石英粉的掺量为 4%,树脂掺量为 5%,体积分数 10%的有机物 X 掺量为 2%,制得透水砖的面层抗压强度达到 25.0 MPa,透水系数高于 $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。按照此配比制备得到不同尺寸的砂基层透水砖,如图 7 所示。

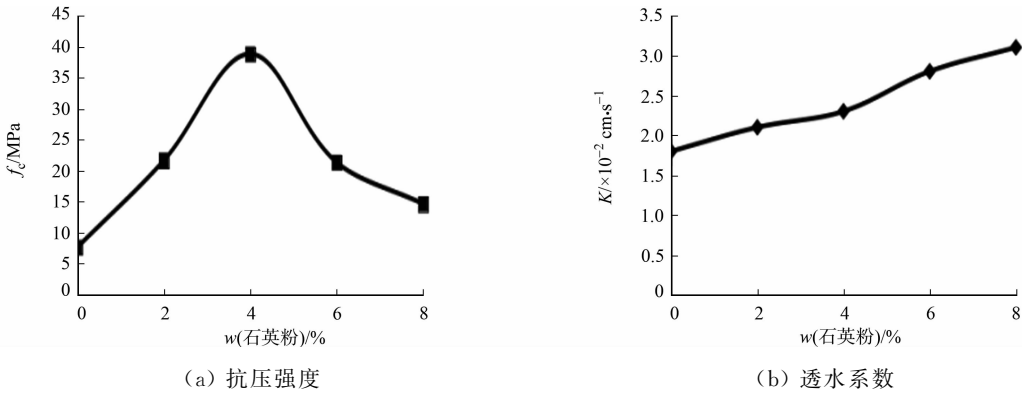


图 6 有机物 X 和石英粉掺量对树脂砂基混合料性能影响

Fig. 6 Effect of organic materials-X and quartz powder on properties of resin-sand mixture



图 7 砂基透水砖样品

Fig. 7 Samples of permeable resin-sand brick

2.3 基层透水混凝土的性能分析

作为 EPBCS 的下部基层结构,在初试阶段,透水混凝土使用的骨料粒径为 10.0~15.0 mm,细石(w_G):水泥(w_C):水(w_W)=3.0:1.0:0.55. 由于新拌混合料的和易性较差,骨料粒径过于单一且粗大,因此,拟用透水混凝土的骨料粒径为 2.5~7.0 mm. 拟定 4 种配比,即 $w_G:w_C:w_W$ 分别为 3.0:0.6:0.2,3.0:0.8:0.3,3.0:1.0:0.3,3.0:1.0:0.5,水泥为普通的 P. O 42.5 水泥(少量矿物掺合料暂不列出). 基层透水混凝土在标准养护箱中养护 28 d 后取出,对成型后材料的抗压强度和透水性能进行对比分析,结果如图 8 所示.

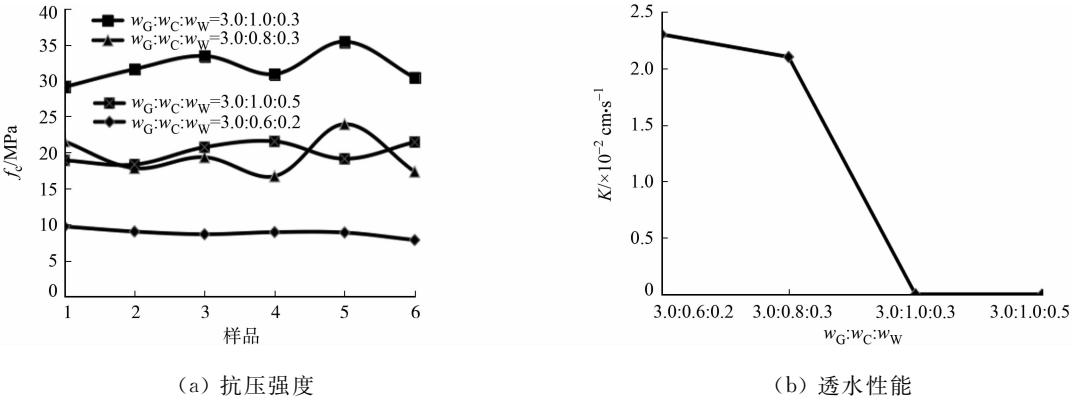


图 8 水泥基混合料强度

Fig. 8 Strength of cement-based mixture

由图 8 可知:当 $w_G:w_C:w_W=3.0:0.8:0.3$ 时,水泥基混合料的抗压强度均高于 16.71 MPa; 当 $w_G:w_C:w_W=3.0:0.6:0.2,3.0:0.8:0.3$ 时,透水混凝土具有较好的透水性. 结合材料的抗压强度特性,拟定 $w_G:w_C:w_W=3.0:0.8:0.3$ 为透水混凝土的基本配比,在满足抗压强度的基础上,测得 6 个相同配比样品的抗折强度(f_{cf}),如图 9 所示.

实验结果表明:设计的 EPBCS 的基层透水混凝土的性能满足《规范》对路面砖抗折、抗压及透水性能的基本要求. 因此,将这部分混合料配比 $w_G : w_C : w_W = 3.0 : 0.8 : 0.3$, 作为复合结构生态透水砖的基层配比.

2.4 复合结构透水砖的性能

根据上述结果,以树脂砂基混合料为面层、透水混凝土为基层,制备 EPBCS 样品,如图 10 所示. EPBCS 的抗压强度、抗折强度和透水系数,如图 11 所示.

由图 11 可知:养护 28 d 后,试件的抗压强度平均值均高于 25.0 MPa,抗折强度均超过 2.5 MPa,且平均透水系数均高于 $2.5 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,说明设计的透水砖 EPBCS 满足《规范》的要求.

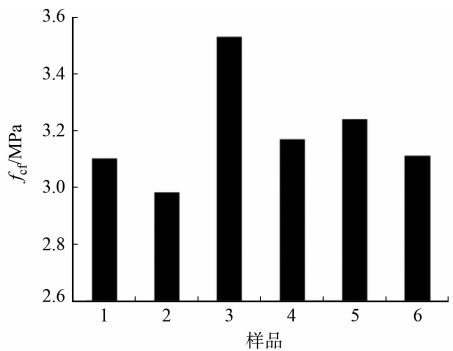
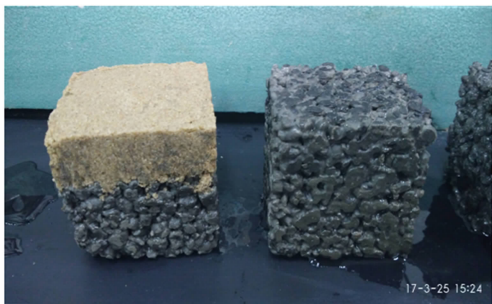


图 9 基层透水混凝土抗折强度
Fig. 9 Flexural strength of permeable concrete at base layer

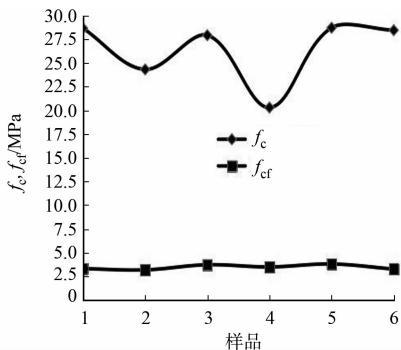


(a) 样品

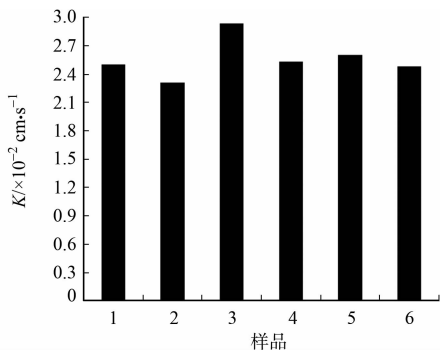


(b) 成品

图 10 EPBCS 样品
Fig. 10 Samples of EPBCS



(a) 力学性能



(b) 透水性能

图 11 EPBCS 性能
Fig. 11 Properties of EPBCS

3 树脂砂基混合料透水机理分析

树脂材料能够对砂粒混合料进行有效地固化,但是,实验选用的树脂材料为典型的憎水性材料,在固化过程中对混合料的透水性能产生显著不利影响. 协调树脂、石英粉及砂粒三者在混合料中的结构特征,使其形成较多的透水通道,是改善面层砂基混合料透水性能的关键^[26-27]. 随着各物料掺量的调整,石英粉在树脂砂基混合料中的状态,如图 12 所示.

当树脂和石英粉相对掺量较少时,树脂砂基混合料以表面具有树脂裹覆层的微粒为主,且这层树脂裹覆层本身属于憎水性材料,在混合料的成型过程中,外力的震压作用使微粒之间的有效空间体积较小,且被大量的树脂材料填充,因此,混合料内部透水通道变得非常稀少. 由图 12(a)可知:在此状态下,虽然混合料的力学性能较好,但是透水性能却较差,即使利用有机物 X 改善了透水性能,但因为胶凝材

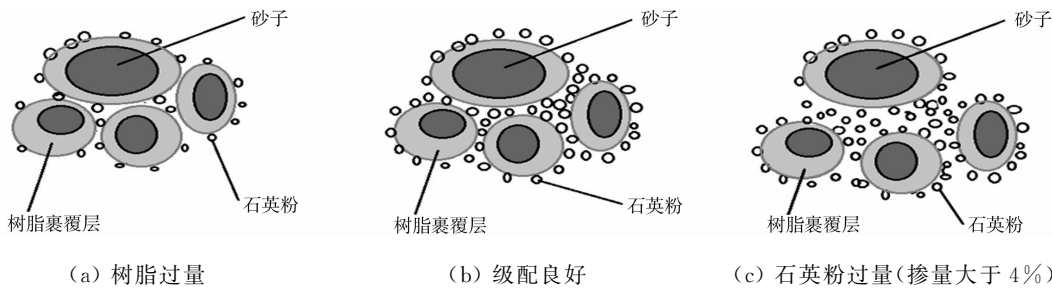


图 12 石英粉在树脂砂基混合料中的分布状态

Fig. 12 Distribution of quartz powder in resin-sand mixture

料过少,整体的力学性能也不能满足要求.由图 12(b)可知:随着混合料中石英粉和树脂掺量的增大,具有树脂裹覆层结构的微粒外表粘附了大量的石英粉颗粒,从而使填充在微粒之间树脂的有效接触面积相对减小,微粒间的空隙得到了石英粉颗粒的有效填充,由此增加了微粒间的有效通道,使混合料的整体透水性能得到增强;同时,随着体系中树脂和石英粉掺量的增大,相对较多的树脂组分导致部分石英粉颗粒表面粘附一层树脂,而这部分微粒在体系中的有效分散形成相互粘接的网状结构,对维护混合料整体的力学性能起到了积极作用,加之有机物 X 对混合料透水性能的改善,混合料在此状态下既能表现出较好的透水性能,又能具有较好的力学性能.由图 12(c)可知:当混合料中石英粉的掺量大于 4% 时,微粒间存在过量的石英粉颗粒,导致混合料颗粒间有效的通道数量增加,混合料整体的透水性能明显增强,但是微粒间因能够有效接触的树脂量减少而导致混合料整体的粘结性能降低,因此,整体强度出现降低趋势.

4 结论

- 1) 掺入适量的石英粉能够在保持树脂砂基混合料的基本抗压、抗折性能的基础上适当改善其透水性能,但效果不明显.
- 2) 掺入有机物 X 能够在较高树脂掺量的条件下对树脂砂基混合料的透水性能产生显著的改善效果,并且暂未发现对抗压强度和抗折强度产生负面影响.
- 3) 面层树脂砂基混合料中,树脂掺量为 5%,石英粉掺量为 4%,体积分数为 10% 的有机物 X 的掺量为 2%;基层透水混凝土基本组分为 $w_G : w_C : w_W = 3.0 : 0.8 : 0.3$ (少量矿物掺合料暂不列出);以上述树脂砂基混合料和透水混凝土作为 EPBCS 的面层和基层,所制得的材料力学性能和透水性能均满足相关《规范》的要求.

参考文献:

[1] 张丽,刘梁森,吴晓青,等.含涤废弃织物增强水泥基透水砖的制备及表征[J].复合材料学报,2016,33(4):866-874. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20160102.002.

[2] 王奕仁,李春萍,王爱勤,等.垃圾衍生燃料气化后的无机底渣制备透水砖试验研究[J].环境工程,2014,32(增刊 1):619-622.

[3] ZONG Lan,FEI Zhengyue,ZHANG Shiping,*et al.* Permeability of recycled aggregate concrete containing fly ash and clay brick waste[J]. Journal of Cleaner Production,2014,70:175-182. DOI:10.1016/j.jclepro.2014.02.040.

[4] 吕淑珍,顾幸勇.利用萤石尾矿和珍珠岩废矿粉研制陶瓷透水砖[J].新型建筑材料,2009(8):31-34. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2009.08.011.

[5] NISHIGAKI M. Producing permeable blocks and pavement bricks from molten slag[J]. Waste Management,2000,20(2/3):185-192. DOI:10.1016/S0956-053X(99)00323-2.

[6] 马养志.透水砖的生产工艺与发展前景[J].砖瓦,2004(7):47-49. DOI:10.16001/j.cnki.1001-6945.2004.07.017.

[7] JIAN Quanji,LU Yueshi,LIU Yujia,*et al.* Application of waste bamboo materials on produced eco-brick[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science),2012,17(3):380-384. DOI:10.1007/s12204-012-1292-y.

[8] 赵耀芳.碱激发固硫灰地聚物制备透水砖的工艺研究[J].商品混凝土,2017(9):40-43.

[9] 苏有文,聊若寒,周良峥,等.聚合物改善透水混凝土性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2018(6):7-10,34. DOI:

10. 19761/j. 1000-4637. 2018. 06. 002.

[10] 刘璐. 混凝土基透水砖制备与铺装设计研究[D]. 大连:大连理工大学,2014:19-39.

[11] LI Ying,YANG Jianrong,GUO Tingting. The study of convertibility of water cement ratio in recycled water permeable concrete[J]. Advanced Materials Research,2011,250/251/252/253:218-221. DOI:10. 4028/www. scientific. net/AMR. 250-253. 218.

[12] 蔡润泽,满都拉,陈思晗. 砂基透水混凝土路面砖胶结料试验研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(6):1995-2001.

[13] LEIPARD A R,KEVERN J T,RICHARDSON J R. Hydraulic characterization and design of permeable interlocking concrete pavement[C]// World Environmental and Water Resources Congress. Austin: American Society of Civil Engineers,2015:292-301. DOI:10. 1061/9780784479162. 028.

[14] LUCKE T,WHITE R,NICHOLS P,*et al.* A simple field test to evaluate the maintenance requirements of permeable interlocking concrete pavements[J]. Water,2015,7(6):2542-2554. DOI:10. 3390/w7062542.

[15] STARKE P,GÖBEL P,COLDEWEY W G. Effects on evaporation rates from different water-permeable pavement designs[J]. Water Science and Technology,2011,63(11):2619-2627. DOI:10. 2166/wst. 2011. 168.

[16] 黄展魏,陈伟,李秋,等. 水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能基微观结构[J]. 硅酸盐通报,2017,36(8):2530-2535. DOI:10. 16552/j. cnki. issn1001-1625. 2017. 08. 003.

[17] BERLINEANU A,王学智. 新型生态环保透水砂浆的制备和应用[J]. 化工新型材料,2005,33(3):66-68. DOI:10. 3969/j. issn. 1006-3536. 2005. 03. 020.

[18] 贺图升,赵旭光,赵三银,等. 复合结构透水砖配合比参数研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(1):34-38. DOI:10. 3963/j. issn. 1671-4431. 2014. 01. 006.

[19] 王萍萍,徐向舟. 砂基透水砖的制备及性能优化研究[J]. 新型建筑材料,2013(8):44-47. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2013. 08. 013.

[20] 许军凯,辛梅华,李明春,等. 硅材料改性水性聚氨酯的研究进展[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(5):627-635. DOI:10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201806002.

[21] 曾宪沂,彭红涛,卞立波,等. 砂基多孔隙透水材料探析[J]. 施工技术,2018,47(6):1278-1279.

[22] 蔡润泽,满都拉,陈思晗. 砂基透水混凝土路面砖胶结料试验研究[J]. 硅酸盐通报,2018,37(6):1995-2001. DOI:10. 16552/j. cnki. issn1001-1625. 2018. 06. 033.

[23] 杨三强,黄士周. 水胶比、级配对砂基透水砖透水系数及强度的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2017,14(4):30-35.

[24] 汪俊松,韩雪颖,张玉. 透水铺装材料湿物理性质测定[J]. 土木建筑与环境工程,2018,40(4):20-26. DOI:10. 11835/j. issn. 1674-4764. 2018. 04. 004.

[25] 李鹏. 聚合物改性再生骨料透水砖的性能研究[J]. 新型建筑材料,2018(2):137-140. DOI:10. 3969/j. issn. 1001-702X. 2018. 02. 036.

[26] 许静贤. 砂基透水砖的黏模问题研究[J]. 混凝土与水泥制品,2018(2):77-81. DOI:10. 3969/j. issn. 1000-4637. 2018. 02. 017.

[27] 王萍萍. 树脂砂基透水砖的制备及性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2013:6-28.

(责任编辑:黄晓楠

英文审校:方德平)