

Properties of Recycled Concrete Permeable Bricks Prepared with Different Aggregates Designed with Orthogonal Test

Xuanyi Wang*, Ruizhen Yan#, Hangyu Li

College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi
Email: wxuanyi12@126.com, #yanruizhen2266@163.com

Received: Feb. 25th, 2020; accepted: Mar. 12th, 2020; published: Mar. 19th, 2020

Abstract

Based on the orthogonal test design, the influence of recycled aggregate type, water to cement ratio, aggregate to cement ratio and aggregate-grade on properties of permeable bricks was respectively investigated, including compressive strength, open porosity and permeability coefficient. The method of range analysis and variance analysis was used to analyze the influence degree and influence law of various factors on the performance of permeable bricks. The results show that the aggregate type has the significant influence on the compressive strength of permeable bricks; the ratio of water to cement and the ratio of aggregate to cement are the key factors of open porosity and the water to cement ratio has a greater influence. The aggregate type and the aggregate to cement ratio have a greater influence on the permeability coefficient, nevertheless there is no significant connection at the 0.1 level. Under the testing condition, the best properties of permeable bricks reached with the recycled concrete as aggregate, at 0.3 of water-cement ratio and 4 of aggregate to cement ratio.

Keywords

Orthogonal Test, Recycled Aggregate, Permeable Brick, Compressive Strength, Water Permeability Coefficient

基于正交试验的不同骨料再生混凝土透水砖性能研究

王宣懿*, 阎蕊珍#, 李航宇

太原理工大学土木工程学院, 山西 太原
Email: wxuanyi12@126.com, #yanruizhen2266@163.com

*第一作者。

#通讯作者。

收稿日期：2020年2月25日；录用日期：2020年3月12日；发布日期：2020年3月19日

摘要

通过正交试验设计，研究了再生骨料种类、水灰比、骨胶比和骨料级配对再生混凝土免烧透水砖抗压强度、开口孔隙率及透水系数的影响。采用极差分析和方差分析验证的方法分析了各因素对透水砖性能的影响程度及影响规律，结果表明，骨料种类对透水砖抗压强度影响最大；水灰比和骨胶比是影响透水砖开口孔隙率的关键因素，其中水灰比影响较大；骨料种类和骨胶比对透水系数影响较大，但在0.1水平上并无显著性。在试验范围内，废旧混凝土作为再生骨料，水灰比为0.3，骨胶比为4时，透水砖的主要使用性能(抗压强度、透水系数)达到最佳。

关键词

正交试验，再生骨料，透水砖，抗压强度，透水系数

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国城市化的快速发展进程中，越来越多的地面被城镇建筑和混凝土路面等覆盖，据统计[1]，北京市地面硬化面积已超过市中心地面面积的80%，这种“硬化路面”的形成使得自然降水难以渗流，破坏了自然水文循环，加之部分城市极端暴雨天气频发，中国内涝问题已非常严重[2]；同时，地表径流峰值增加，排水不足造成的“城市高温化现象”愈加严重[3]，有数据分析表明[4]，二十世纪80年代中后期，高温化现象已使城市年平均气温增加了0.65℃，占气候变暖增温的147.7%。透水砖因其良好的透水性和蓄水、净水等作用[5]，对改善水生态、减少地面硬化问题有重要作用，成为构建“海绵城市”的重要技术之一，已受到广泛关注。

另一方面，中国正处于建设期，每年都产生大量的建筑垃圾，预计到2020年，中国建筑垃圾年产量高达20亿吨[6]，受多种因素的影响，目前，国内对建筑垃圾主要的处置方式仍为垃圾场堆积或填埋，造成了严重的土地资源浪费、环境污染等问题[7]。特别地，中国是产煤大国，煤矿开采过程中产生的固体废物——煤矸石累积总量已达70亿多吨[8]，2017年，仅山西省就产出煤矸石1.3千万吨。为促进资源再利用，改善城市生存环境，响应中央提出的绿色“海绵城市”概念，国内外已开展了利用固废制备透水砖的研究，较多研究[9][10]侧重于将废旧混凝土作为骨料制备透水砖；也有研究显示[11]，将废旧砖进行强化后制备的透水砖也能满足正常使用；此外，也有关于煤矸石作为骨料的免烧透水砖制备方法及其性能方面的试验探究[12][13]。本试验主要以三种不同废弃物作为骨料制备免烧透水砖，采用四因素三水平的正交试验设计，探讨不同骨料对免烧透水砖性能的影响。

2. 原材料及试验方案

2.1. 原材料

水泥：山西省阳泉市冀东水泥股份有限公司生产的普通硅酸盐水泥P·O42.5。其性能见表1。

Table 1. Performance index of ordinary portland cement P·O42.5**表 1.** 普通硅酸盐水泥 P·O42.5 性能指标

细度/%	比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	凝结时间/Min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa		三氧化硫/%
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d	
2	339	150	216	5.2	6.6	26	54.3	2.24

再生骨料分别为城中村改造产生的废旧砖块、混凝土以及山西太原西山煤区洗煤所产煤矸石，破碎筛分后，粒径 5~10 mm 为粗骨料，粒径 2.5~5 mm 为细骨料，其物理性能见表 2；外加剂：太原市鸿泽玉有限公司生产的聚羧酸减水剂，减水率为 35%；试验用水为自来水。

Table 2. Physical properties of recycled aggregate**表 2.** 再生骨料物理性能

骨料	煤矸石	再生砖	再生混凝土
表观密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1750	1710	2216
吸水率/%	2.56	14.42	4.54
堆积密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1133	846	1186

2.2. 正交试验方案设计

本试验拟研究不同固废作为骨料时对透水砖抗压强度、开口孔隙率和透水性等性能的影响，大量研究显示，影响透水砖上述性能的因素主要为水灰比、骨胶比和骨料级配。为分析不同因素对透水砖性能的影响程度，采用正交试验设计方法，其中骨料分别为煤矸石、废旧砖废旧混凝土；水灰比的三水平为 0.25、0.3、0.35；骨胶比(骨料与胶凝材料质量比)选取 3、4、5 三个水平；骨料级配选取三水平，为粗骨料(5~10 mm)和细骨料(2.5~5 mm)之比 10:0、8:2、7:3。试验因素和水平如表 3，具体正交试验设计方案如表 4 所示。

Table 3. Factors and levels**表 3.** 因素与水平表

因素	水灰比	骨胶比	骨料级配(粗:细)	骨料种类
水平 1	0.25	3	10:0	煤矸石
水平 2	0.30	4	8:2	废旧砖
水平 3	0.35	5	7:3	废旧混凝土

Table 4. Orthogonal experimental design**表 4.** 正交试验设计

编号	A (水灰比)	B (骨胶比)	C (骨料级配)	D (骨料种类)
1	1 (0.25)	1 (3)	1 (10:0)	1 (煤矸石)
2	2	2	1	2
3	3	3	1	3
4	1	2 (4)	2	3
5	2 (0.30)	3	2 (8:2)	1
6	3	1	2	2 (废旧砖)
7	1	3 (5)	3	2
8	2	1	3	3 (废旧混凝土)
9	3 (0.35)	2	3 (7:3)	1

2.3. 试件制作

本试验中所用透水砖试件均采用静压成型工艺。具体过程如下：将不同类型骨料破碎、筛分后进行预湿处理，随后以水泥裹石法进行搅拌。使拌合物达到手捏成团、落地分散的状态；将拌合物自然平铺满模具(加入拌合物至溢满状态，多次振捣后用刮刀铺平)，成型压力为 4.5 MPa，定荷 30 s，脱模，在室温静置 1 d 后放入养护室，在 20 (±5)℃，相对湿度 90% 条件下养护 28 d 后进行性能试验。透水砖制作流程如图 1 所示。

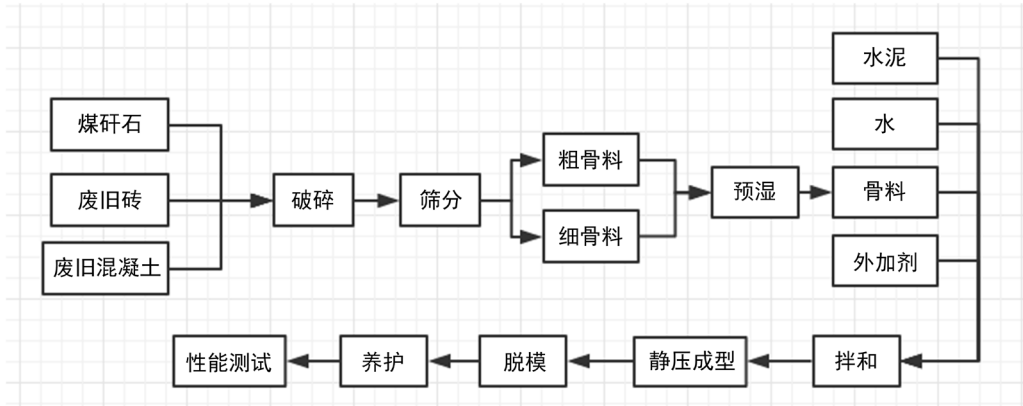


Figure 1. Flow chart of permeable brick manufacturing process

图 1. 透水砖制作工艺流程图

2.4. 性能试验

本试验制作试件为尺寸 200 mm × 100 mm × 60 mm 透水砖用于抗压强度试验, 250 mm × 250 mm × 60 mm 透水砖进行钻芯取样用于开口孔隙率试验和透水系数试验, 取芯试件尺寸为 Ø75mm × 60 mm。

透水砖抗压强度试验按照 JC/T95-2005《透水砖》，在 STYE-3000C 型全自动混凝土压力试验机上进行，实验室自制尺寸为 120 mm × 60 mm × 30 mm 钢制垫压板，硬度大于 HB200；开口孔隙率试验根据 ASTM C1688/C1688M-2011《新拌透水混凝土密度和孔隙量的标准试验方法》规定进行，先通过蜡封排液法测出试件实际体积 V_0 ，称量绝干透水砖的质量后计算其表观密度；对烘干冷却的试件进行 30 min 真空处理和 20 min 饱水处理，测出完全浸水时试件浮重 W_1 和沥干表面水分后在空气中湿重 W_2 ，以公式(1)计算开口孔隙率 P 。

$$P = \left[1 - \frac{W_2 - W_1}{V_0} \right] \times 100\% \quad (1)$$

透水砖透水系数试验在浙江上虞探矿仪器厂生产的透水系数测试装置中进行，其原理参照文献[14]，透水系数 K_T 计算公式如式(2)所示。

$$K_T = \frac{QL}{AH_t} \quad (2)$$

式中： K_T ——水温为 T℃ 试件的透水系数，cm/s；

Q ——试件 t 秒内的渗出水量，ml；

L ——试件的厚度，cm；

A ——试件的上表面面积，cm²；

H ——水位差，cm；

T ——时间，s。

3. 结果与讨论

3.1. 正交试验结果与极差分析

正交试验的正交性和综合性减少了繁杂的试验次数, 表 5 为本试验所设计的四因素三水平数据处理结果。A (水灰比) 因素在第 i 水平下试验数据和值的平均数为 K_{Ai} , 其数据的变化就可以大体代表 A 因素在不同水平下对该性能试验数据的影响结果, 所以 R_A (因素 A 的极差) 可以看作是 A 因素的水平变化对该物理性能影响程度的大小, R_A 越大说明 A 因素影响程度越大。

Table 5. Orthogonal test results of permeable bricks

表 5. 透水砖正交试验结果

因素	抗压强度/MPa				开口孔隙率/%				透水系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)			
	K_1	K_2	K_3	R	K_1	K_2	K_3	R	K_1	K_2	K_3	R
A	16.8	27.9	26.4	11.1	5.8	2.7	5.2	3.1	0.036	0.021	0.022	0.015
B	25.6	17.9	27.6	9.7	3.3	4.7	5.7	2.4	0.018	0.041	0.020	0.023
C	23.3	20.0	27.9	7.9	5.6	4.3	3.7	1.9	0.022	0.039	0.017	0.022
D	16.7	15.8	38.7	22.9	4.8	4.7	4.2	0.6	0.013	0.022	0.043	0.031

注: A、B、C 和 D 分别为水灰比、骨胶比、骨料级配和骨料种类; K_i 为第 i 水平下该因素所做试验的数据之和的平均数, 极差 R 是 K_i 最大值与最小值的差值。

由表 5 可知, 在抗压强度试验中, 骨料种类的极差最大, 说明骨料种类对再生透水砖抗压强度影响程度最大, 其中采用废弃混凝土作为骨料时的抗压强度 K 值为 38.7 MPa, 是废旧砖作骨料透水砖抗压强度 K 值 15.8 MPa 的 2.45 倍, 这与成高立[15]试验研究结果相同, 其它对透水砖抗压强度影响显著因素依次分别为水灰比、骨胶比和骨料级配, 图 2 为不同因素不同水平下抗压强度变化图, 由图 2 可知, 随着水灰比的增加, 抗压强度先增大后减小, 随着骨胶比的增加抗压强度先减小后增大。根据试验结果, 最优水灰比为 0.3, 骨胶比为 5, 骨料粗细比例为 7:3, 骨料为废旧混凝土效果最佳。

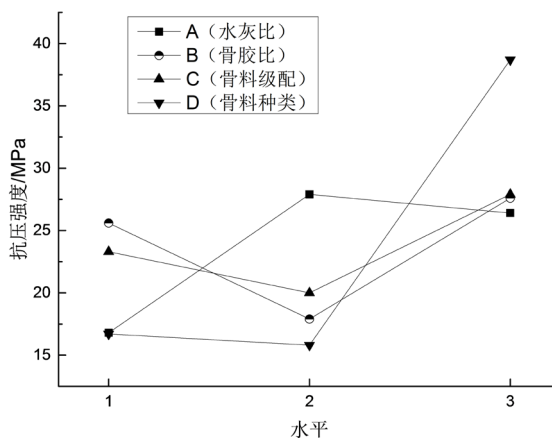


Figure 2. Compressive strength of permeable bricks under different factors

图 2. 不同因素下透水砖的抗压强度

根据表 5, 各因素对透水砖开口孔隙率影响显著程度依次为: 水灰比 > 骨胶比 > 骨料级配 > 骨料种类。图 3 为不同因素影响下透水砖的开口孔隙率, 从图 3 可以看到, 透水砖的开口孔隙率随着骨胶比的增大而增大, 随着骨料粗细比例的减小和骨料种类的变化而减小。另外, 骨料种类对开口孔隙率的影响最小。

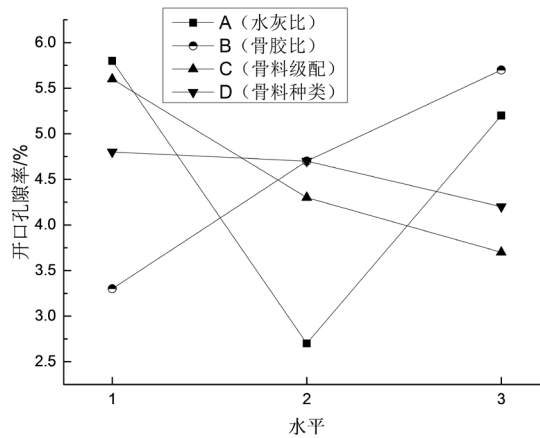


Figure 3. Openings porosity of permeable bricks under different factors
图 3. 不同因素下透水砖开口孔隙率

各因素对透水砖透水系数的影响程度顺序为: 骨料种类 > 骨胶比 > 骨料级配 > 水灰比, 由图 4 可知, 透水系数随着水灰比的增加而减小, 极差值最小, 说明水灰比对透水系数影响较小; 随着骨胶比和骨料级配的水平变化呈先增大后减小的趋势, 且骨料种类对透水系数影响最大。

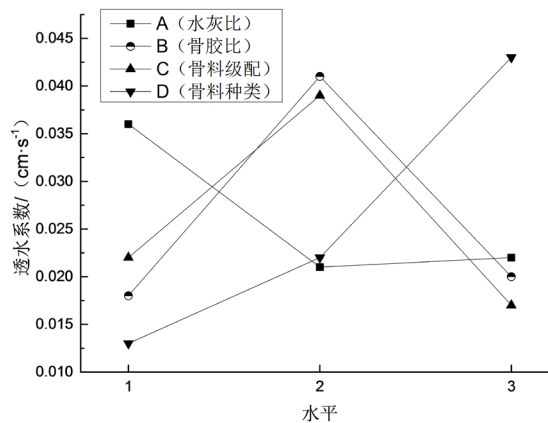


Figure 4. Permeability coefficient of permeable bricks under different factors
图 4. 不同因素下透水砖的透水系数

3.2. 影响因素分析

抗压强度和透水系数是透水砖主要性能指标, 其中骨料种类对抗压强度影响最大, 其原因主要是废旧混凝土破碎而成的骨料与新水泥砂浆之间物理契合性高, 而且新水泥砂浆可能会引起旧水泥砂浆产生新的水化反应, 提高骨料之间的摩擦强度而提高混凝土的抗压强度, 水灰比和骨胶比主要对骨料之间粘结的强度有影响, 由此可知: 再生混凝土透水砖的抗压强度主要受骨料与水泥砂浆粘结强度的影响。

从图 3 和图 4 可以看出, 在本试验中开口孔隙率与透水系数没有表现出相关性, 可能是因为开口孔隙率高不代表透水砖内的连通开口孔多, 如前所述, 开口孔受到水灰比及骨胶比的影响显著。这是因为在其他因素不变的情况下, 胶凝材料的减少使水泥砂浆与骨料之间结合界面的厚度发生了变化, 并且骨料之间可能由原来的通过水泥砂浆的面接触粘结发展为通过点接触粘结, 生成了新的空隙, 从而提高了开口孔隙率; 而骨料粗细比例的减小提高了拌合物中细骨料(2.5~5 mm)的相对占有率, 进一步降低了骨料之间的空隙, 并且骨料表面的部分开口孔也会因骨料彼此间接触面积的增加以及水泥砂浆的填充而变为闭口孔。

3.3. 数据的方差分析

为进一步确定在极差分析中各因素对透水砖各项性能的影响是否显著,对试验数据进行了方差分析,结果如表 6 所示。

Table 6. Analysis of variance of permeable brick performance
表 6. 透水砖性能方差分析

	因素	A (水灰比)	B (骨胶比)	C (骨料级配)	D (骨料种类)	误差 E
抗压强度	平方和 S	217.6	157.4	108.7	1023.5	109.0
	自由度 f	2	2	2	2	2
	均方和 V	108.8	78.7	54.3	511.7	54.5
	F 比	2.0	1.4	1.0	9.4	
开口孔隙率	平方和 S	162.0	8.7	2.9	0.6	0.6
	自由度 f	2	2	2	2	2
	均方和 V	8.1	4.4	1.5	0.3	0.3
	F 比	27.0	14.5	4.9	1.0	
透水系数	平方和 $S/10^{-5}$	42.2	97.4	64.1	126.5	42.2
	自由度 f	2	2	2	2	2
	均方和 $V/10^{-5}$	21.1	48.7	32.1	63.3	21.1
	F 比	1.0	2.3	1.5	3.0	

由表 6 可知,透水砖抗压强度中 F 比最大值 $F_D = 9.4$,开口孔隙率试验中 F 比最大值 $F_A = 27$,与显著水平临界值 $F_{(2,2)0.10} = 9.0$ 和 $F_{(2,2)0.05} = 19.0$ 相比,抗压强度试验中 $F_D = 9.4 > F_{(2,2)0.10} = 9.0$,说明在 0.10 的水平上(90%可信度)骨料种类对抗压强度试验的影响显著;在开口孔隙率试验中 $F_A = 27.0 > F_{(2,2)0.10} = 9.0$ 且 $F_A = 27.0 > F_{(2,2)0.05} = 19.0$,由此可见,水灰比对开口孔隙率的影响无论在 0.10 水平上还是 0.05 水平上(95%可信度)都具有显著性,而 $F_B = 14.5$ 只大于 $F_{(2,2)0.10}$,可以确定水灰比为开口孔隙率的主要影响因素;在透水系数试验中,骨料种类为最大影响因素,但得到的 F 比都小于 $F_{(2,2)0.10}$,因此各因素在 0.10 水平上都不具有显著。

4. 结论

1) 影响再生混凝土透水砖抗压强度的主要因素为骨料种类,且与骨料和水泥砂浆粘结强度大小有关,不同骨料种类的再生骨料与砂浆之间的粘结能力不同。为使透水砖达到良好的抗压强度,宜采用废旧混凝土作为骨料,且本试验范围内,最优水灰比为 0.3,骨胶比为 5,骨料级配为 7:3。

2) 开口孔隙率的最大影响因素是水灰比,骨料种类是影响透水系数的关键因素,开口孔隙率大小与透水系数无直接关系。骨料种类、水灰比和骨胶比是影响再生混凝土透水砖抗压强度、开口孔隙率与透水系数的主要因素,且抗压强度与透水系数有较好相关性。

影响再生混凝土透水砖使用的主要指标为抗压强度和透水系数,本研究得出骨料种类是影响两种指标的关键因素,且都在第三水平(废旧混凝土作为骨料)达到最大值,因此,宜将废旧混凝土作为骨料制备透水砖,并对影响其性能的主要参数进行深入分析。

参考文献

- [1] 于漳佩, 朱红梅. 城市生态建设中地面过度硬化问题的思考[C]//2011 年湖南科技论坛——国土资源分论坛暨 2011 年湖南省地质学会学术年会, 长沙, 2012.
- [2] 张静波, 蔺建学. 透水砖在海绵城市建设中的应用[J]. 砖瓦世界, 2016(9): 27-28.
- [3] 赵红军. 透水混凝土生态环境效益分析[J]. 产业与科技论坛, 2012, 11(11): 134-135.
- [4] 马林, 孙艳云, 张钰祺, 等. 城市热岛效应增温对环境气温的影响[J]. 装备环境工程, 2019, 16(6): 78-84.
- [5] 张栋, 齐敏. 透水砖的优势及市场前景分析[J]. 砖瓦, 2014(1): 38-40.
- [6] 江媛云, 余建杰, 周小娟. 建筑垃圾处理及再生骨料利用现状分析[J]. 水利规划与设计, 2019(4): 122-125.
- [7] 肖绪文, 冯大阔, 田伟. 我国建筑垃圾回收利用现状及建议[J]. 施工技术, 2015, 44(10): 6-8.
- [8] 王鹏涛. 煤矸石综合利用的现状及其存在的问题研究[J]. 科学技术创新, 2019(16): 182.
- [9] 薛俊, 刘军, 季明旭, 等. 以再生建筑混凝土为骨料制备透水砖[J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34(5): 51-55.
- [10] 周旭, 罗成俊, 周圣庆. 建筑垃圾再生骨料制备透水砖的研究[J]. 砖瓦世界, 2016(10): 51-57.
- [11] 刘庆东, 张信龙, 秦文萍. 废弃砖再生骨料的强化及其应用研究[J]. 混凝土, 2018(2): 42-45.
- [12] 赵亚兵, 张新朋, 吴楠. 环保免烧结煤矸石透水砖的制备方法及其透水性能[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(12): 3254-3260.
- [13] 孔德明, 阎蕊珍, 闫亚杰, 等. 基于正交试验的煤矸石免烧透水砖性能影响因素分析[J]. 混凝土, 2018(6): 117-120.
- [14] 芋艳梅. 机械力化学活化煤矸石的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京工业大学, 2006.
- [15] 成高立, 李晓光. 再生骨料构成对混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 1103-1108.