文章编号：1674－2869(2026)03－0349－06

透水再生混凝土配合比设计研究

丁兆宇，边晓亚*，任成强
武汉工程大学土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430074

摘 要：透水混凝土作为环境友好型材料，被广泛应用于各种基础设施，其在结构性能方面极具特殊性（如高孔隙率等），因而长期服役极易导致其物理性能和耐久性能降低。采用再生骨料制备透水再生混凝土，设计四因素三水平正交试验，采用极差法分析再生骨料替代率、颗粒级配、水灰比、目标孔隙率对透水再生混凝土抗压强度和渗透系数的影响规律。试验结果表明：当再生骨料替代率为50%、颗粒级配为3∶1、水灰比为0.3、目标孔隙率为18%时，透水再生混凝土物理性能表现最佳，其抗压强度和渗透系数分别为26.2 MPa、2.3 mm/s。研究结果可以为透水再生混凝土的制备提供依据。

关键词：透水再生混凝土；正交实验；配合比设计；抗压强度；渗透系数
中图分类号：TU502　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202210001

Mixture proportion design of pervious recycled concrete

DING Zhaoyu*, *BIAN Xiaoya**, *REN Chengqiang
School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Pervious concrete, as an environmentally friendly material, is widely used in various infrastructure applications. However, due to its unique structural characteristics such as high porosity, its physical properties and durability tend to degrade during long-term service. In this study, pervious recycled concrete was prepared using recycled aggregates. A four-factor, three-level orthogonal experiment was designed to investigate the effects of recycled aggregate replacement rate, particle gradation, water-cement ratio, and target porosity on the compressive strength and permeability coefficient of pervious recycled concrete. The range analysis method was employed to evaluate the influence of these factors. The results showed that the optimal physical performance was achieved when the recycled aggregate replacement rate was 50%, the particle gradation ratio was 3∶1, the water-cement ratio was 3∶10, and the target porosity was 18%. Under this optimal mix proportion, the compressive strength and permeability coefficient of the pervious recycled concrete reached 26.2 MPa and 2.3 mm/s, respectively. The findings of this study provide a theoretical basis for the preparation of pervious recycled concrete.

Keywords: pervious recycled concrete; orthogonal experiment; mixture proportion design; compressive strength; permeability coefficient

透水混凝土采用单一粒径级配或不连续颗粒级配的粗骨料作为骨架体系，其内部孔隙不均匀分布，可以使得雨水快速渗入地表，补充地下水位，并且有效缓解城市热岛效应[1-2]。相较于传统混凝土，透水混凝土存在大量的孔隙且内部密实度低只能应用于公园小路、人行道、轻载公路等领域[3]。

随着我国建筑行业的发展，旧建筑拆除产生

收稿日期：2022-10-03
基金项目：国家自然科学基金（52078396）；武汉工程大学大学生校长基金（XZJJ2021146）
作者简介：丁兆宇，本科。Email：834029364@qq.com
***通信作者**：边晓亚，博士，教授。Email：bianxy@wit.edu.cn
引文格式：丁兆宇，边晓亚，任成强．透水再生混凝土配合比设计研究[J]．武汉工程大学学报，2026，48(3)：349-354.

了大量的建筑垃圾。根据数据统计，中国每年的建筑垃圾产量约为24亿t，其中废弃混凝土占30%~40%[4]。废弃物管理和建筑行业发展的主要目标是提高资源利用效率，在环境、技术和经济上可接受范围内将废弃混凝土收集起来，加工后取代天然资源再生骨料。因此，将再生骨料应用于透水混凝土路面基层，充分发挥透水再生混凝土众多特色，形成了“1+1＞2”的文明生态效果[5-6]。

基于生态节能和可持续发展的理念，利用再生骨料制备透水混凝土是目前研究的热点。袁汉卿等[7]研究发现再生骨料替代率为50%时，透水再生混凝土力学性能最优，渗透性能随再生骨料含量的增加逐渐增大。代峻峰等[8]总结了水胶比、孔隙率、粒径级配和再生骨料掺量等因素对透水再生混凝土抗压强度、渗透性能和耐久性能的影响。Chen等[9]研究透水再生混凝土物理性能之间的关系，发现其抗压强度、劈裂强度和渗透系数均符合正态分布规律，其抗压强度和渗透系数之间明显存在对立特征。夏冬桃等[10]采用极差法分析水胶比、目标孔隙率、再生粗骨料取代率、粉煤灰掺量和聚丙烯纤维掺量对透水再生混凝土抗压强度、有效孔隙率、渗透系数的影响规律，发现影响透水再生混凝土抗压强度因素的主次顺序为目标孔隙率>再生粗骨料取代率>水胶比>聚丙烯纤维掺量>粉煤灰掺量。再生粗骨料粒径的增大会降低透水混凝土的抗压强度[11]。张超等[12]研究发现再生骨料透水混凝土开裂模式受胶凝材料性能和再生骨料含量影响。周清长[13]研究发现当骨灰比为3.5、砂率为20%、水胶比为0.4时，透水再生混凝土抗压强度可达到20 MPa，且渗透系数可达1.43 cm/s。因此按此配合比制作透水性路面砖可取得较好的经济和环境效益。

本文采用再生骨料替代部分天然骨料制备透水混凝土，利用正交试验方法，以再生骨料替代率、目标孔隙率、颗粒级配、水灰比为影响参数，每个因素设计3个水平，研究各种因素和水平对透水再生混凝土抗压强度和渗透系数的影响；并采用极差分析法得出因素对抗压强度和渗透系数影响程度的主次顺序，最终确定透水再生混凝土最佳配合比。

1 试验部分

1.1 材 料

水泥采用P.O 42.5级普通硅酸盐水泥，其物理性能指标见表1。天然骨料粒径范围为9.5~16 mm；再生骨料源于武汉地区拆除的老旧居民楼产生的废弃混凝土，经人工初步破碎和颚式破碎机破碎，筛分、清洗获得，属于Ⅱ类再生骨料，其粒径为4.75~16.00 mm，骨料物理性能指标见表2。减水剂为聚羧酸高效减水剂，减水率约为30%。

表1 水泥物理性能指标

Table 1 Physical properties of cement

ρ / (kg·m^{-3})	标准稠度用水量 / %	安定性	凝结时间 / min		抗压强度/ MPa		抗折强度/ MPa	
			初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3 150	28.1	合格	231	296	25.3	47.9	4.8	7.9

表2 骨料性能指标

Table 2 Properties of aggregates

骨料类别	粒径范围 / mm	表观密度 / (kg/m^3)	堆积密度 / (kg/m^3)	吸水率 / %	压碎值 / %
天然	9.50~16.00	2 700	1 510	0.7	2.3
再生	4.75~9.50	2 670	1 266	4.3	8.6
再生	9.50~16.00	2 631	1 269	8.3	12.3

1.2 透水再生混凝土配合比设计

透水再生混凝土配合比设计参数为：目标孔隙率分别取15%、18%、21%，水胶比分别取0.27、0.30、0.33，再生骨料替代率分别取40%、50%、60%，颗粒级配是粒径(4.75~9.50) mm的再生骨料与粒径(9.50~16.00) mm再生骨料的质量比，分别取1∶3、1∶1、3∶1。

通过前期试验发现，体积法适用于透水再生混凝土配合比设计。通过以下公式计算试验材料用量，材料用量见表4。

表3 正交试验方案

Table 3 Orthogonal experimental design

因素水平	替代率 Z / %	水灰比 X	颗粒级配 V	目标孔隙率 N / %
1	40	0.27	1∶3	15
2	50	0.30	1∶1	18
3	60	0.33	3∶1	21

表4　透水再生混凝土材料用量

Table 4　Material consumption of pervious recycled concrete

编号	ρ(水泥)/(kg/m³)	ρ(天然骨料)/(kg/m³)	ρ(再生骨料)/(kg/m³)	ρ(水)/(kg/m³)	ρ(减水剂)/(kg/m³)
1	465.59	887.88	591.92	125.71	4.19
2	412.97	887.88	591.92	123.89	3.72
3	367.61	887.88	591.92	121.31	3.31
4	395.61	739.90	739.90	106.81	3.56
5	425.86	739.90	739.90	127.76	3.83
6	403.20	739.90	739.90	133.06	3.63
7	434.78	591.92	887.88	117.39	3.91
8	375.22	591.92	887.88	112.57	3.38
9	410.79	591.92	887.88	135.56	3.70

(1)胶结体用量按式(1)计算：

$$W_J = (1 - \frac{W_G}{P_G} - R_{void}) \times P_j \quad (1)$$

式(1)中：W_G为单位体积再生透水混凝土胶结浆体用量，kg/m³；P_G为粗骨料表观密度，kg/m³；R_{void}为目标孔隙率，%；P_j为胶结浆体密度，kg/m³。

(2)胶凝材料用量按式(2)计算：

$$W_B = \frac{W_J}{1 + W/C} \quad (2)$$

式(2)中：W_B为单位体积再生骨料透水混凝土胶结材料用量，kg/m³；W/C为水灰比。

(3)用水量按式(3)计算：

$$W_W = W_J - W_B \quad (3)$$

式(3)中：W_W为单位体积再生骨料透水水泥混凝土拌合用水量，kg/m³。

(4)粗骨料用量按式(4)计算：

$$W_G = P_{GC} \times a \quad (4)$$

式(4)中：W_G为单位体积粗骨料用量，kg/m³；P_{GC}为粗骨料的紧密堆积密度，kg/m³；α为折减系数，取0.98。

(5)减水剂单位体积量是水泥单位体积量的0.9%。

1.3　试件制备工艺、成型方式和养护方式

1.3.1　制备工艺　透水再生混凝土制备工艺与普通混凝土的制备有所差异，为了提高透水再生混凝土的工作性能，通过二次投料法制备透水再生混凝土，以确保骨料与浆体之间有良好的黏结。试验过程如下：首先用少量水将搅拌锅内壁润湿，然后将骨料投入卧式单轴搅拌机，拌和60 s；接着投入60%的减水剂和水，拌和60 s；再投入均匀混合的水泥拌和120 s；最后投入剩余的水，拌和120 s。停止搅拌后，观察混合料表面是否有金属光泽，手握成团是否松散，判断能否达到性能要求，满足条件后即可出料，将混合料倒在铁板上，再利用铁锹均匀复拌5次，使其达到均匀性，若没有明显结块现象就可以装模。透水再生混凝土制备过程如图1所示。

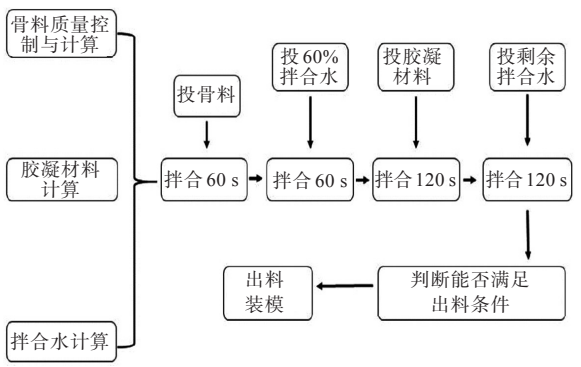

图1　二次投料法流程图

Fig. 1　Flow chart of two-step mixing method

1.3.2　成型方式　采用“人工插捣+机械震动”方式成型。将混凝土拌合料(见图2)分3层装入模具(见图3)，每次装料后使用插捣棒从试模中心向四周均匀插捣30次，装填完毕后将模具置于振动台振动10 s后取下，放置在平整区域养护24 h后拆模[14]。

1.3.3　养护方式　待实验室养护24 h后拆模，将试件置于养护室内28 d，养护室温度和空气湿度分别设置为(20±2) ℃和(98±2)%。见图4。



图2　透水再生混凝土搅拌料

Fig. 2　Pervious recycled concrete mixture



图3 试件成型装置

Fig. 3 Specimen molding device



图4 试件养护

Fig. 4 Specimens under curing

2 试验方法

2.1 抗压强度

试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm，抗压强度试验按照(GB/T 50081—2019)[15]进行测试。加载速率保持在0.3~0.5 MPa/s。混凝土抗压强度取3个样本抗压强度的平均值，由于试验采用非标准试件，计算时乘以转换系数0.95。抗压强度按式(5)计算。

$$f_{cc}=\frac{F}{A} \tag{5}$$

式(5)中：f_{cc}为立方体抗压强度，MPa；F为试件破坏荷载，N；A为试件承压面积，mm²。

2.2 渗透系数

参照《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)[16]固定水头法测定渗透系数。以层流为假设条件，依据达西定律计算试件渗透系数，渗透系数按式(6)计算。

$$K=\frac{D}{h_0}\frac{Q}{A_0\times t} \tag{6}$$

式(6)中：K为渗透系数，cm/s；D为试件厚度，cm；h_0为水头差，cm；Q为时间t秒内流过的水量，mm³；A_0为试样截面积，mm²；t为测试时间，s。

3 结果与讨论

3.1 试验结果

颗粒级配对透水再生混凝土抗压强度与渗透系数的影响如图5所示。由图5可知，当颗粒级配为(1∶3)~(3∶1)的取值范围内，透水再生混凝土抗压强度随颗粒级配的增大先减小后增大、渗透系数随颗粒级配的增大先增大后减小。颗粒级配较小时，骨料间存在着大量连通孔隙，内部密实度都较低，从而导致混凝土力学强度降低、渗透性增高；反之，当骨料级配增大，细骨料数量增多，堆积填充结构内部孔隙，从而增强力学强度、渗透性下降。

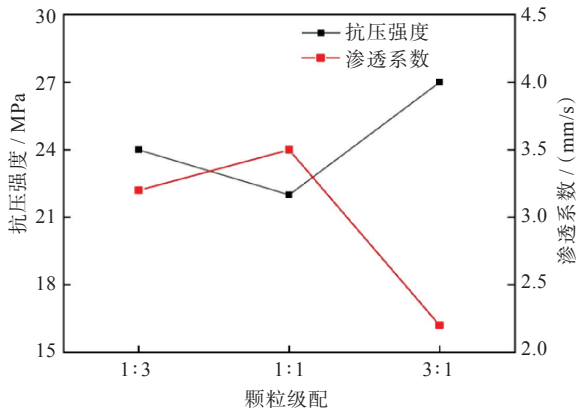

图5 颗粒级配对抗压强度和渗透系数的影响

Fig. 5 Effect of particle gradation on compressive strength and permeability coefficient

孔隙率对透水再生混凝土抗压强度与渗透系数的影响如图6所示。由图6可知，当目标孔隙率在15%~18%，随孔隙率的增大，透水再生混凝土抗压强度减小、渗透系数增大。随孔隙率的增大，混凝土内部结构松散，导致抗压强度降低；而混凝土的渗透性与孔隙率呈正相关，随孔隙率的增大，其渗透性能逐渐增强。

水灰比对透水再生混凝土抗压强度与渗透系数的影响见图7。由图7可知，当水灰比在0.27~0.33，透水再生混凝土的抗压强度随水灰比的增大先增大后减小，渗透系数随水灰比的增大先减小后增大。水灰比过小导致拌合物过于干硬，试件难以成型，残留的孔隙较多，从而透水再生混凝土渗透系数增大；水灰比过高导致浆体过稀，水泥浆在重力的作用下沿混凝土孔隙流出，混凝土的黏

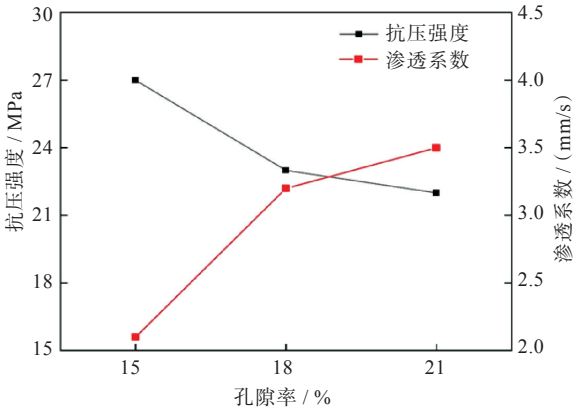

图6　孔隙率对抗压强度和渗透系数的影响

Fig. 6　Effect of porosity on compressive strength and permeability coefficient

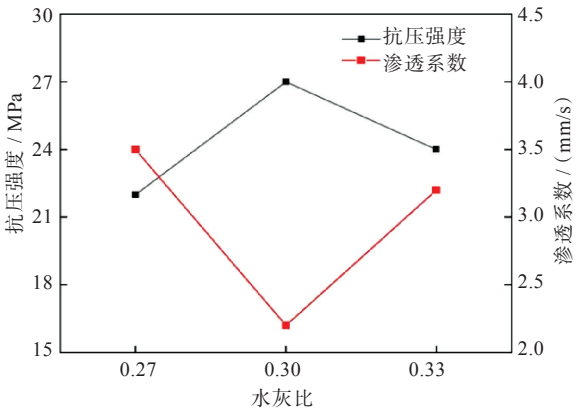

图7　水灰比对抗压强度和渗透系数的影响

Fig. 7　Effect of water-cement ratio on compressive strength and permeability coefficient

结性变差、内部孔隙增多，透水再生混凝土的抗压强度降低、渗透系数增高。

再生骨料替代率对透水再生混凝土抗压强度与渗透系数的影响如图8所示。由图8可知，当再生骨料替代率在40%~60%的范围内，透水再生混凝土随着再生骨料替代率的增大先增大后减小，

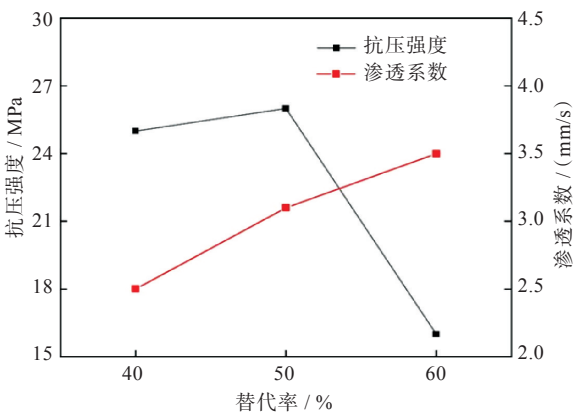

图8　替代率对抗压强度和渗透系数的影响

Fig. 8　Effect of replacement rate on compressive strength and permeability coefficient

渗透系数随着再生骨料替代率的增大而增大[17]。使用再生骨料适量替代天然骨料可使抗压强度提升。当再生骨料替代率大于50%，受再生骨料表面老水泥砂浆的影响，其内部骨料之间的黏结性较差，内部孔隙增大，从而使透水再生混凝土抗压强度下降。

3.2　极差分析

为了直观分析各因素水平对透水再生混凝土影响强弱关系，采用抗压强度和渗透系数平均值k_i反映同一因素不同水平对试验结果的影响，通过计算每一因素在相同水平下对应的抗压强度之和，以及渗透系数之和K_i，均值处理后计算最大值与最小值之差，即R值，对4种因素对应的R值进行比较，可得出4种因素对抗压强度或者渗透系数影响程度的主次顺序。具体结果如表5和表6所示。

表5　抗压强度极差分析

Table 5　Range analysis of compressive strength

水平因素	Z	X	V	N	影响权重	最佳配比
k_1	23.3	20.7	20.6	23.0		
k_2	24.1	21.3	21.6	22.0		
k_3	16.0	21.4	20.7	19.4	$Z>N>V>X$	$Z2X3V2N1$
R	8.1	0.7	1.0	3.6		

表6　渗透系数极差分析

Table 6　Range analysis of permeability coefficient

水平因素	Z	X	V	N	影响权重	最佳配比
k_1	2.7	2.8	3.0	2.4		
k_2	3.0	3.0	2.9	3.0		
k_3	3.0	2.9	2.7	3.3	$N>Z=V>X$	$Z2X2V1N3$
R	0.3	0.2	0.3	0.9		

（1）表5数据显示Z、X、V、N对抗压强度的影响程度从大到小为$Z>N>V>X$，且替代率的极差R较其他影响因素的极差大。其中Z组数值离散程度最大，即替代率对抗压强度的影响程度最大，孔隙率次之，颗粒级配和水灰比对透水再生混凝土的影响较小。考虑抗压强度选择$Z2X3V2N1$（即根据表3，再生骨料替代率选择水平因素2、水灰比选择水平因素3、颗粒级配选择水平因素2、孔隙率选择水平因素1）。

（2）表6数据显示Z、X、V、N对渗透系数的影响程度从大到小为：$N>Z=V>X$，因素Z、X、V的极差R波动较小。在3组数据中可发现，孔隙率对渗透系数的影响最大，虽然Z组R值与V组相同，但观察可发现，V组数据离散程度更高，即V组所表示的因素影响程度更大，故颗粒级配对试件透水

性能的影响大于再生骨料替代率，而水灰比对渗透系数影响较小。考虑渗透系数选择$Z2X2V1N3$。

通过正交试验对透水再生混凝土的物理性能进行研究，发现透水再生混凝土抗压强度与渗透性能间存在对立关系，其抗压强度的提升导致渗透性能降低，渗透性能的提升降低了抗压强度发展空间。综合考虑透水再生混凝土路面结构，在渗透系数满足条件下尽可能提高抗压强度，当骨料替代率为50%、颗粒级配为3∶1、水灰比为0.3、孔隙率为18%时，透水再生混凝土的性能最优，其抗压强度和渗透系数分别为26.2 MPa、2.3 mm/s。

4 结 论

（1）颗粒级配、目标孔隙率、水灰比、再生骨料替代率对透水再生混凝土抗压强度和渗透系数影响效果不同。

（2）通过极差分析可知，各因素对透水再生混凝土抗压强度的影响主次顺序为：再生骨料替代率 > 目标孔隙率 > 颗粒级配 > 水灰比；各因素对透水再生混凝土渗透系数的影响主次顺序为：目标孔隙率 > 颗粒级配 > 再生骨料替代率 > 水灰比。

（3）综合透水再生混凝土路面结构考虑，得出透水再生混凝土最佳配合比为：再生骨料替代率50%、颗粒级配3∶1、水灰比0.3、目标孔隙率18%，此时透水再生混凝土物理性能表现最佳，其抗压强度和渗透系数分别为26.2 MPa、2.3 mm/s。

参考文献

[1] 李子成，张爱菊，隋修志，等. 透水混凝土界面增强增韧效应研究[J]. 硅酸盐通报，2017，36(2)：747-752.

[2] 顾晓帆. 透水混凝土制备及其性能试验研究[D]. 青岛：青岛理工大学，2018.

[3] 刘双. 透水混凝土在海绵城市建设中的工程应用[J]. 混凝土世界，2019(1)：87-90.

[4] 荣玥芳，张新月，张典，等. 基于绿色发展理念的建筑垃圾源头减量规划研究[J]. 北京建筑大学学报，2022，38(1)：9-17.

[5] BARNHOUSE P W，SRUBAR W V. Material characterization and hydraulic conductivity modeling of macroporous recycled-aggregate pervious concrete [J]. Construction and Building Materials，2016，110：89-97.

[6] KAPLAN G，GULCAN A，CAGDAS B，et al. The impact of recycled coarse aggregates obtained from waste concretes on lightweight pervious concrete properties [J]. Environmental Science and Pollution Research，2021，28(14)：17369-17394.

[7] 袁汉卿，蒋友宝，崔玉理，等. 再生骨料透水混凝土的渗透性和抗压强度[J]. 材料导报，2018，32(增刊2)：466-470.

[8] 代峻峰，李合清，崔永伟，等. 海绵城市理论下透水再生骨料混凝土研究进展[J]. 建筑结构，2021，51(增刊2)：988-994.

[9] CHEN S K，ZHAO Y P，BIE Y J. The prediction analysis of properties of recycled aggregate permeable concrete based on back-propagation neural network [J]. Journal of Cleaner Production，2020，276：124187.

[10] 夏冬桃，李向阳，胡军安. 基于正交试验的透水再生混凝土性能优化试验研究[J]. 硅酸盐通报，2022，41(8)：2748-2758.

[11] 于函. 再生骨料透水混凝土性能及超声波波速与透水混凝土性能关系试验研究[D]. 长春：吉林大学，2019.

[12] 张超，任鹏鹏，邓鹏，等. 再生骨料透水混凝土力学性能和耐久性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2023，50(3)：185-194.

[13] 周清长. 建筑垃圾再生混合骨料混凝土的受力性能及透水性研究[D]. 厦门：厦门大学，2009.

[14] 范伟. 透水混凝土研究进展[J]. 材料导报，2017，31(增刊2)：413-416.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准：GB/T 50081—2019[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2019.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 再生骨料透水混凝土应用技术规程：CJJ/T 253—2016[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2016.

[17] 周启，陈旭勇，程书凯，等. 再生粗骨料对不同强度等级混凝土性能的影响[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(5)：534-539.

本文编辑：张 瑞