

再生骨料透水混凝土力学性能和耐久性研究

张超^{1,2},任鹏鹏^{1,2},邓鹏¹,诸子青¹,高翔¹,郭帅成^{1,2,3†}

(1. 湖南大学土木工程学院,湖南长沙 410082;

2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南长沙,410082;

3. 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室,湖南长沙410082)

摘要:从优化水泥基体角度出发,搭配使用不同掺量的再生细骨料,旨在全面提升再生骨料透水混凝土力学性能、渗透性和耐久性。首先,采用单纯形重心设计法对水泥(C)、粉煤灰(FA)和硅灰(SF)组成的三元胶凝体系进行优化设计,获得高性能水泥基体。然后,分析了高性能水泥基体和再生骨料质量分数(0%、30%和50%)对透水混凝土力学性能和耐久性的影响。试验发现,使用高性能胶凝材料,可以显著提升再生骨料透水混凝土的抗压强度和冻融耐久性,且可满足渗透性要求。当再生骨料质量分数为0%、30%和50%时,28 d抗压强度分别提升72.4%、100%和44.2%;50次冻融循环质量损失分别为1.5%、2.2%和2.5%。此外,研究发现再生骨料透水混凝土的破坏模式与胶凝材料性能和再生骨料质量分数相关,可为再生骨料透水混凝土设计和应用提供参考。

关键词:高性能透水混凝土;再生骨料;力学性能;耐久性;渗透性

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A

Study on Mechanical Properties and Durability Performance of Pervious Concrete Containing Recycled Aggregate

ZHANG Chao^{1,2}, REN Pengpeng^{1,2}, DENG Peng¹, ZHU Ziqing¹, GAO Xiang¹, GUO Shuaicheng^{1,2,3†}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education (Hunan University), Changsha 410082, China;

3. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Changsha 410082, China)

Abstract: This study aims to comprehensively improve the mechanical properties, permeability and durability of the pervious concrete with recycled aggregate through optimization of cementitious matrix and adding recycled fine aggregate with different content. Firstly, the simplex-centroid design method was used to optimize the ternary cementing system composed of cement (C), fly ash (FA) and silica fume (SF), and the high-performance cementitious matrix is obtained. Then, the effects of high-performance cementitious matrix and recycled aggregate content (0%,

* 收稿日期:2022-01-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1904704), National Key Research and Development Program of China (2019YFC1904704); 湖南大学大学生创新训练(SIT)计划项目(S202110532097, S202110532307), Students Innovation Training (SIT) Program of Hunan University (S202110532097, S202110532307)

作者简介:张超(1990—),男,河南新乡人,湖南大学教授,博士生导师

† 通信联系人, E-mail: seguo@hnu.edu.cn

30% and 50%) on mechanical properties and durability of pervious concrete were analyzed. The experimental results show that the compressive strength and freeze-thaw durability of pervious concrete with recycled aggregate can be significantly improved by using high-performance cementitious materials, and it can also meet the permeability requirements. When the recycled aggregate content is 0%, 30% and 50%, the 28 d compressive strength is increased by 72.4%, 100% and 44.2%, respectively; the mass loss of 50 freeze-thaw cycles was 1.5%, 2.2% and 2.5%, respectively. In addition, it is found that the failure mode of pervious concrete with recycled aggregate is related to the performance of cementitious material and the content of recycled aggregate, which can provide a reference for the design and application of pervious concrete with recycled aggregate.

Key words: high-performance pervious concrete; recycled aggregate; mechanical performance; durability; permeability

随着我国工业化、城镇化进程的不断深入,建筑、基础设施建设等行业快速发展,在新建、改建、扩建、拆除等生产环节中产生了大量的建筑垃圾. 2020年我国建筑垃圾总量超30亿t,通常采用简单填埋、露天堆放等方式处理,有效回收利用率为5%,造成了严重的资源浪费和环境污染^[1-2]. 据统计,我国约75%的城市面临“被垃圾包围”的困扰,严重阻碍了城市的发展,加重了城市环境负载^[3]. 与此同时,2020年我国天然砂石需求总量约为200亿t,大规模开采天然砂石将导致资源枯竭和生态环境恶化. 因此,亟须加强建筑垃圾资源化利用.

建筑垃圾经破碎、分级、水洗、烘干等工艺处理形成再生骨料,可用于制备透水混凝土. 透水混凝土是指不含或含有少量细骨料的特殊混凝土,内部具有相互连通的孔隙,雨水可快速入渗,被美国环境保护署纳入低影响雨水处理方案^[4-5]. 透水混凝土作为海绵城市建设中的关键基础材料,具有净化雨水、避免城市内涝、缓解城市热岛效应等优点^[5-7],被广泛应用于停车场、人行道、景观通道等场景^[8-9].

再生骨料透水混凝土是一种典型的非均质、多相复合材料,强度低和耐久性差是制约其应用推广的主要原因. 首先,与普通混凝土相比,骨料间为“点-点”连接,抗压强度取决于胶凝材料性能,通常为5~15 MPa^[10-11]. 其次,再生骨料经二次破碎作用形成,表面附着有旧砂浆,与天然骨料相比,具有孔隙率高、吸水率高、微裂缝多、压碎指标大、坚固性差、非均质性高等缺陷^[12],影响界面过渡区(ITZ)性能. 因此,再生骨料透水混凝土在雨水冲刷、冻融侵蚀、硫酸盐侵蚀等环境荷载作用下,骨料更易受到侵蚀

剥落,从而导致部分或整体功能失效.

目前,对于再生骨料透水混凝土耐久性提升的研究较少,可分为配合比优化设计、再生骨料强化处理、胶凝材料优化设计三种类别.

第一类是通过优化配合比设计,如调整再生骨料含量^[13-14]、水灰比^[15-16]、骨料粒径^[17]、孔隙率^[18]、添加剂等提升再生骨料透水混凝土整体力学性能,进而提升耐久性. 再生骨料由于自身的缺陷,随着其含量的增加,将导致透水混凝土强度和耐久性降低^[19]. 研究表明,再生骨料含量低于15%时,不会对透水混凝土力学性能造成明显影响,含量超过30%时将显著降低其强度^[20]. 低水灰比可以提升基体的密度,降低冻融侵蚀作用对其耐久性的影响. 然而,降低水灰比对强度提升效果有限,过低的水灰比将制约水化反应并降低拌合物的和易性,影响整体成型质量^[21]. 提高细骨料比例有利于细化透水混凝土内部孔隙结构,提高抗压强度. 然而,这将导致再生骨料透水混凝土的整体孔隙率和渗透性降低. 因此,采用传统的透水混凝土配合比设计方法难以消除再生骨料缺陷对其耐久性的影响,不能保障在同时满足渗透性和力学性能的前提下,实现再生骨料的高比例掺入.

第二类是采用再生骨料强化处理手段改善其表面微观结构,消除骨料缺陷带来的不利影响. 按照强化机理可以进一步划分为两种. 一种是采用机械研磨、超声波清洗、酸性溶液分解等方法去除表面附着的旧砂浆,这类方法通常适用于旧砂浆附着率较低的再生骨料. 另一种是对旧砂浆进行强化处理,通常采用火山灰浆液浸泡、水玻璃浸泡、聚合物乳液浸泡

等方法,改善ITZ微观力学性能和微观结构,增强再生骨料与基体间的黏结力,继而提高再生骨料透水混凝土力学性能和耐久性。然而,鉴于骨料强化方法工艺繁琐,经济成本高,再生骨料强化处理手段难以实现应用推广。

第三类是从优化胶凝材料角度开展再生骨料透水混凝土力学性能提升研究。粉煤灰、硅灰等辅助胶凝材料可以提升水泥基体性能,改善ITZ的微观结构^[22-23]。Shen等^[24]采用粉煤灰和硅灰对水泥基体进行优化设计,认为高性能水泥基体可以显著提升透水混凝土力学性能。Zhong等^[25]研究发现,透水混凝土抗压强度与水泥基体强度呈正相关。因此,采用高性能胶凝材料有望解决再生骨料透水混凝土强度低和耐久性差的问题。然而,目前关于高性能胶凝材料的研究较少,其对再生骨料透水混凝土力学性能、水力特性和长期耐久性的影响尚不明确。

本研究采用单纯形重心设计法对水泥-粉煤灰-硅灰组成的三元胶凝体系进行优化设计。基于优化后的高性能胶凝材料,搭配使用再生细骨料(4.75~9.5 mm)和天然粗骨料(9.5~13.2 mm),系统分析了高性能胶凝材料和再生骨料含量对再生骨料透水混凝土力学性能、渗透性和耐久性的影响。本研究有助于拓宽再生骨料透水混凝土的应用场景,促进建筑固体废物大规模资源化再利用。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验选用南方牌P•O42.5普通硅酸盐水泥,辅助胶凝材料为粉煤灰和硅灰,材料物理参数和化学组成见表1。天然粗骨料为当地采石场的碎石,再生细骨料由废弃混凝土回收厂提供,经破碎、筛分、冲

洗、烘干制备而成,骨料具体参数见表2。减水剂为西卡公司生产的聚羧酸型高效减水剂,减水率为22%。

表1 辅助胶凝材料物理参数和化学组成

Tab.1 Physical properties and chemical composition of the supplementary cementitious material

项目	粉煤灰	硅灰
表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 200	2 000
$w(\text{SiO}_2)/\%$	55.05	96.91
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	29.65	0.37
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	4.83	0.11
$w(\text{CaO})/\%$	3.56	0.37
$w(\text{MgO})/\%$	0.69	0.56
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	2.85	0.51
$w(\text{SO}_3)/\%$	0.74	0.25
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	0.87	0.64
$w(\text{其他})/\%$	1.76	0.28

表2 骨料参数

Tab.2 Physical properties of the aggregates

类型	粒径/ mm	表观密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	堆积密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压碎 指标/ $\%$
天然骨料	9.5~13.2	2 700	1 500	5.6
再生骨料	4.75~9.50	2 496	1 388	14.6

1.2 配合比设计

1.2.1 胶凝材料优化设计

采用单纯形重心法对水泥-粉煤灰-硅灰三元胶凝体系进行优化设计,各组分体积分数范围分别为:40%~70%、30%~60%和0%~30%。根据单纯形重心法设计原则, n 个组分优化需 2^n-1 个测试点。本试验含有3个组分,选取三角形顶点、三边中点和中心作为测试点,具体配合比设计见表3。通过目测法判断基体的流动性,基于28 d抗压强度绘制等值线图,确定胶凝材料中各组分的最佳含量。

表3 胶凝材料配合比

Tab.3 Mixture design for the cementitious materials

编号	胶凝材料/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)			$m_{\text{减水剂}}/\text{kg}$	水胶比	$m_{\text{水}}/\text{kg}$
	ρ_{C}	ρ_{FA}	ρ_{SF}			
CON	331.70	—	—	2.65	0.12	39.80
C40FA30SF30	132.68	70.62	64.20	1.61	0.12	32.10
C70FA30	232.19	70.62	0.00	3.03	0.12	36.34
C40FA60	132.68	141.24	—	2.19	0.12	32.87
C55FA30SF15	182.44	70.62	32.10	1.71	0.12	34.22
C55FA45	182.44	105.93	—	2.88	0.12	34.60
C40FA45SF15	132.68	105.93	32.10	1.62	0.12	32.49
C50FA40SF10	165.85	94.16	21.40	1.69	0.12	33.77

注:以C40FA30SF30为例,表示胶凝材料中水泥、粉煤灰和硅灰所占体积分别为40%、30%和30%,其中CON作为参照组。

1.2.2 再生骨料透水混凝土配合比设计

再生骨料透水混凝土采用体积法设计,符合《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)^[26]相关要求.为保障良好的渗透性,目标孔隙率取20%.相较于天然骨料,再生骨料微裂缝较多,且表面附着一层稀松、多孔的旧砂浆,导致其吸收新拌浆体中的水分并降低拌合物流动性.因此将水胶比增加至0.15,并对减水剂含量进行微调,确保拌合物流动性和成型质量.0#作为对照组,胶凝材料为普通硅酸盐水泥,骨料为天然粗骨料;1#~3#为高性能胶凝

材料,骨料为再生细骨料和天然粗骨料组合,再生细骨料掺量水平分别为0%、30%和50%.本试验共计4组,具体见表4.

1.3 试样制备

再生骨料透水混凝土采用水泥净浆包裹法制备,试样采用分层插捣的方式浇筑成型,具体制样操作如下:

1) 将水泥、粉煤灰、硅灰和减水剂加入卧式搅拌机中搅拌2 min.

2) 加入水搅拌3 min.

表4 透水混凝土配合比

Tab.4 Mix proportion of the pervious concrete

编号	胶凝材料/(kg·m ⁻³)			$\rho_{\text{骨料}}/(kg·m^{-3})$		$\rho_{\text{减水剂}}/(kg·m^{-3})$	水胶比	$\rho_{\text{水}}/(kg·m^{-3})$	目标孔隙率/%
	ρ_{C}	ρ_{FA}	ρ_{SF}	细骨料	粗骨料				
0#-0:1	539.40	—	—	—	1470.00	2.05	0.15	80.91	20
1#-0:1	296.67	114.84	52.20	—	1470.00	1.11	0.15	69.56	20
2#-3:7	296.67	114.84	52.20	441.00	1029.00	1.30	0.15	69.56	20
3#-1:1	296.67	114.84	52.20	735.00	735.00	2.23	0.15	68.64	20

注:以2#-3:7为例,2#表示试样组号,3:7表示再生细骨料与天然粗骨料质量之比.预试验结果表明,再生骨料掺量为100%时强度低于10 MPa,不满足路用要求,故未设置.

3) 加入骨料继续搅拌5 min.

4) 采用插捣法分三层浇筑试样,每层厚度大致相同,按照螺旋方向从边缘到中心均匀垂直插捣20~30次,插捣底层时捣棒应接触到试模底部,插捣上层时捣棒应插入下面一层20~30 mm.

5) 常温养护24 h后拆模,再进行90 °C热浴48 h,可代替28 d标准养护^[27].

每组测试项目及试样信息具体见表5.

表5 测试组

Tab.5 Test group

试验项目	尺寸/(mm×mm×mm)	个数	注意事项
孔隙率	150×150×150	3	
渗透性	150×150×150	3	切割 $\phi 100 \times 50$
抗压强度	100×100×100	3	加载速率0.3~0.5 MPa/s
抗折强度	100×100×400	3	加载速率0.02~0.05 MPa/s
冻融循环	100×100×400	3	冻融水平0/25/50/75/100次

1.4 测试方法

1.4.1 有效孔隙率

根据《再生骨料透水混凝土应用技术规程》(CJJ/T 253—2016)^[28]测量孔隙率,测试步骤如下:

1) 将试样放入水中浸泡24 h,测量试样在水中的质量 m_1 .

2) 将试样放入烘箱中烘至恒重,测量其质量 m_2 和体积 V .孔隙率测量以每三个试样为一组,取其平均值,计算公式如下:

$$P = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{\rho V} \right) \times 100\%. \quad (1)$$

式中: P 为有效孔隙率; m_1 为试样在水中的质量,g; m_2 为试件烘干后的质量,g; ρ 为水的密度,g/cm³; V 为试样体积,cm³.

1.4.2 渗透率

按照《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)^[26]测定透水率.圆柱型试样由150 mm×150 mm×150 mm立方体取芯制备而成,直径为100 mm,高度为50 mm.测试前,在试样侧面抹一层硅脂,缠上止水胶带以防止试样与试验装置之间渗水.待渗流稳定后,测量一定时间内的流量,渗透系数计算公式如下:

$$k = \frac{QL}{HA t}. \quad (2)$$

式中: k 为渗透系数,mm/s; Q 为 t 时间内渗出的体积,mm³; L 为试样高度,mm; H 为水头差,mm; A 为试样截面面积,mm²; t 为渗流时长,s.

1.4.3 抗压和抗折强度

抗压强度和抗折强度试验按照国家《普通混凝

土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2016)^[29]进行测试. 抗压强度荷载加载速率为0.5 MPa/s; 三点抗折强度荷载加载速率为0.05 MPa/s. 每三个试样为一组, 计算平均值, 公式如下:

$$f_c = \frac{F}{A}, \quad (3)$$

$$f_t = \frac{3 FL}{2 bh^2}. \quad (4)$$

式中: f_c 和 f_t 分别表示抗压强度和抗折强度, MPa; F 为破坏荷载, N; A 为试样承压面积, mm^2 ; L 为支座间跨度, mm; h 为试样截面高度, mm; b 为试样截面宽度, mm.

1.4.4 冻融循环

目前针对透水混凝土冻融耐久性测试的相关规范尚未建立, 参照国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[30]中的快速冻融法开展冻融循环试验, 共设置5个冻融水平: 0次、25次、50次、75次和100次. 正常服役状态下, 透水混凝土路面在车辆、行人等荷载作用下处于受弯折状态. 为了反映再生骨料透水混凝土在真实服役环境中的性能演变规律, 采用抗折强度、动弹性模量和质量损失率来表征其抗冻融耐久性. 通常认为质量损失率超5%或动弹性模量损失超60%时, 判定试样破坏失效.

按照 ASTM 标准^[31], 依据测得的波形图确定首波传播时间并计算超声波波速, 代入公式(5)计算动态弹性模量, 其中再生骨料透水混凝土的泊松比取为0.25^[32]. 声速测试装置如图1所示, 换能器与透水混凝土界面耦合介质为凡士林, 每个试样选取3~5个测试点, 测试后取平均值.

$$E_d = \rho v^2 \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)}. \quad (5)$$

式中: E_d 为动弹性模量, GPa; ρ 为密度, kg/m^3 ; v 为波速, km/s; μ 为泊松比.

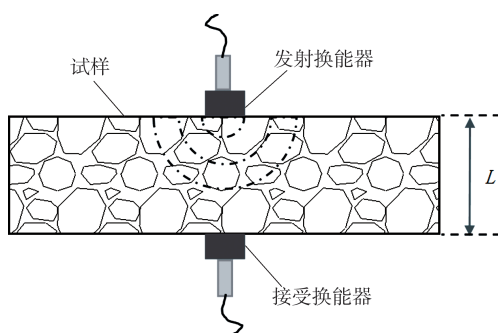


图1 超声波脉冲速度测试

Fig.1 Ultrasonic pulse velocity test

2 结果与讨论

2.1 物理力学特性

2.1.1 胶凝材料强度分析

图2所示为水泥基体抗压强度等值线图. 在水泥-粉煤灰-硅灰三元体系中, 基体抗压强度随硅灰含量的增加而增大. 当硅灰质量分数超15%时, 基体抗压强度达到130 MPa, 满足高性能水泥基体要求. 强化机理可分为两类: 火山灰效应和物理填充效应^[33]. 一方面, 粉煤灰、硅灰与水泥水化产物发生火山灰反应, 消耗基体中的自由水, 产生更多的C-H-S凝胶, 增加了基体的黏结性; 另一方面, 未参与反应的粉煤灰和硅灰可以有效填充基体中的孔隙, 提高基体密实度. Shannag^[34]和 Rao^[35]发现硅灰掺量的最佳范围为15%~20%. 另外, 研究发现粉煤灰质量分数超过45%会显著延缓早期强度发展^[36]. 综合考虑对胶凝材料流动性和抗压强度的性能需求, 确定了高性能胶凝材料中水泥、粉煤灰、硅灰的最佳质量分数分别为55%、30%和15%.

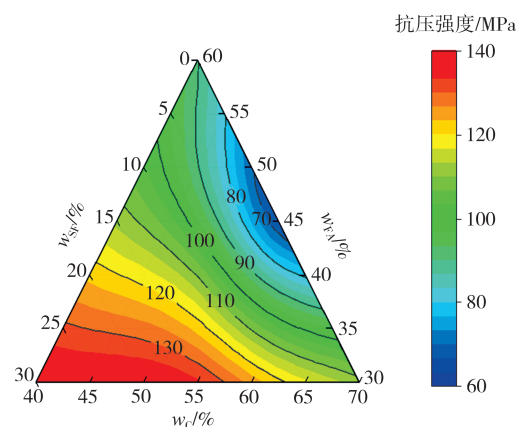


图2 水泥基体抗压强度等值线图

Fig.2 Ternary contour plot for the compressive strength of the cementitious matrix

2.1.2 再生骨料透水混凝土强度

由图3可知, 高性能胶凝材料组的抗压强度均显著高于普通水泥基组. 0#和1#为天然粗骨料组, 抗压强度分别为15.6 MPa和26.9 MPa, 提升幅度为72.4%. 相较于普通水泥基, 高性能胶凝材料大幅度提升了透水混凝土的抗压强度^[37]. 研究还发现, 少量的再生骨料有利于强度发展. 掺入30%再生细骨料, 2#的抗压强度高达31.2 MPa, 抗压强度提升100%. 抗压强度提升可归因于以下几个方面: 首先, 透水混凝土抗压强度与基体性能密切相关, 优化后的胶凝

材料相较于普通水泥基材料具有更高的抗压强度、密实度和黏结性^[24]。其次,基体具有良好的流动性,可以很好地包裹再生骨料并填充其表面微裂缝,改善 ITZ 性能,降低再生骨料缺陷带来的不利影响^[38]。另外,细骨料细化了孔隙结构,增加骨架受力接触点,减小骨料间接触应力^[25]。

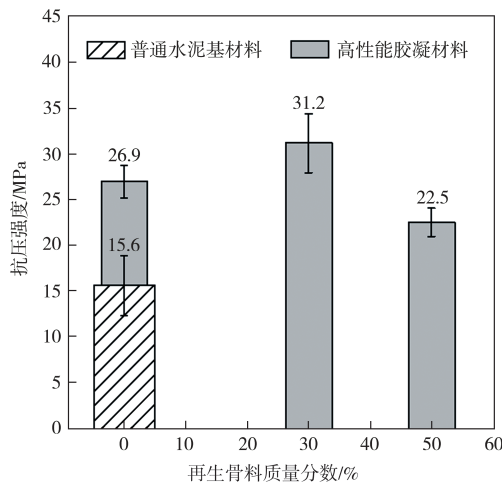


图3 再生骨料透水混凝土抗压强度

Fig.3 Compressive strength of pervious concrete containing recycled aggregate

随着再生细骨料含量继续增加,骨料缺陷凸显,部分抵消了高性能胶凝材料的强化作用。当再生骨料质量分数为50%时,其抗压强度降为22.5 MPa,但仍高于0#对照组44.2%。在实现再生骨料大掺量的同时,力学性能满足人行道、景观通道、广场等应用场景需求,拓宽了再生骨料透水混凝土的应用场景。

如图4所示,高性能水泥基体对抗折强度提升效果显著。0#和1#的抗折强度分别为3.7 MPa和4.9 MPa,抗折强度提升32.4%。然而,随着再生骨料的加入,削弱了高性能水泥基体对抗折强度的提升效果。可能是由于加入再生骨料,使得骨料比表面积增加,减小了骨料表面胶凝材料厚度,导致抗折强度降低。

图5展示了透水混凝土界面破坏模式,0#~3#分别对应图(a)~(d)。由(a)和(b)可知,当不含再生骨料时,基于高性能胶凝材料的透水混凝土开裂模式与普通透水混凝土相同,裂缝仅存在于水泥基体,发生天然骨料-基体间界面破坏。当再生骨料质量分数为30%时,裂缝贯穿再生骨料,发生天然骨料-基体间界面破坏和再生骨料破坏共存的复合模式,如(c)所示。当再生骨料质量分数为50%时,导致骨架整体质量下降,继而发生骨料破坏模式,如(d)所示。

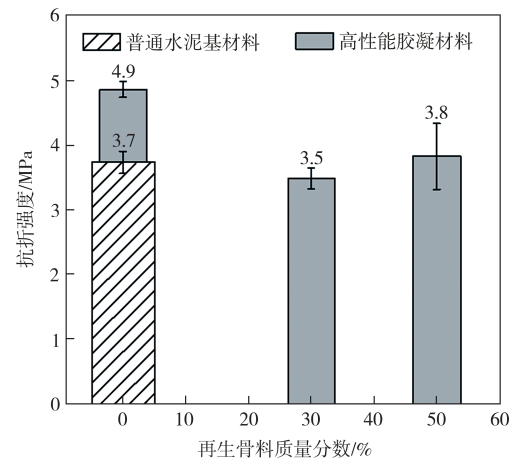


图4 再生骨料透水混凝土抗折强度

Fig.4 Flexural strength of pervious concrete containing recycled aggregate

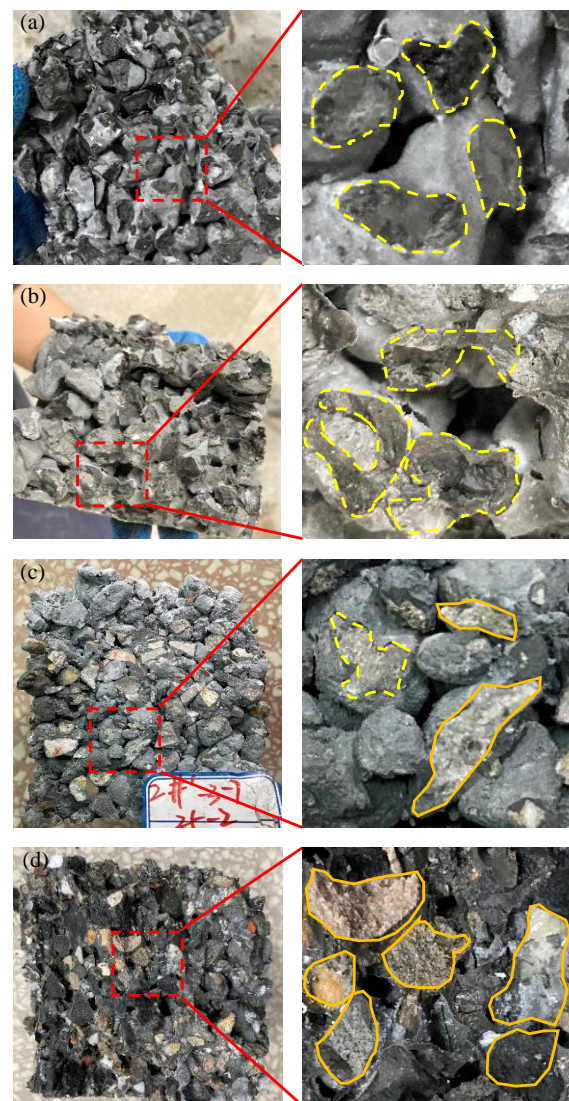


图5 透水混凝土界面破坏模式图

Fig.5 Failure morphology along the interface of pervious concrete

2.1.3 有效孔隙率和渗透性分析

各组目标孔隙率设计值为20%,有效孔隙率和渗透率如图6、图7所示.由于存在制样误差和骨料性能差异,不同组试样之间有效孔隙率存在差别,导致渗透率在合理范围内小幅度降低.对比0#和1#可知,高性能水泥基体对再生骨料透水混凝土渗透性无影响.另外,由1#~3#可知,再生细骨料的加入对渗透性没有造成明显不利影响,渗透系数均约为2.0 mm/s,具有良好的渗透性.

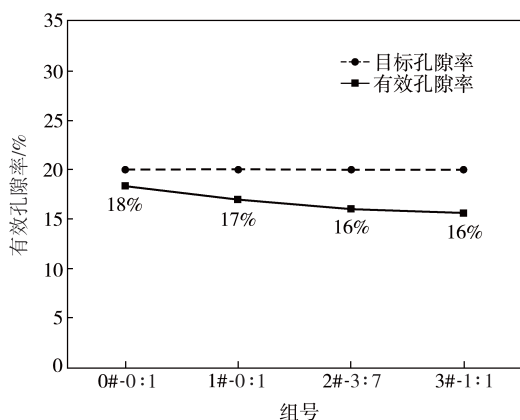


图6 再生骨料透水混凝土有效孔隙率
Fig.6 Effective porosity of pervious concrete containing recycled aggregate

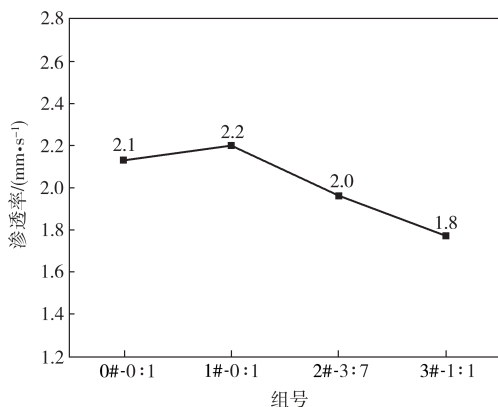


图7 再生骨料透水混凝土渗透率
Fig.7 Permeability of pervious concrete containing recycled aggregate

2.2 耐久性

2.2.1 抗折强度分析

图8所示为各组试样在不同冻融水平下的抗折强度值.随着冻融循环次数的增加,0#抗折强度近乎线性递减;1#~3#在低水平下抗折强度损失缓慢,当冻融循环次数超50次时,抗折强度迅速丧失.在不同冻融水平下,1#~3#的抗折强度均高于0#.因此,高性能胶凝材料有利于提升再生骨料透水混凝土的抗

冻融性能.

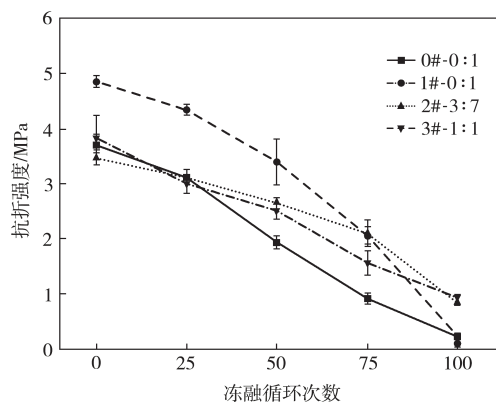


图8 冻融循环对抗折强度的影响
Fig.8 Effects of freeze-thaw cycles on flexural strength

由图9可知,在同一冻融水平条件下,再生细骨料有利于延缓冻融损伤的发展.50次冻融循环后,相较于0#的抗折强度折减率,1#~3#的抗折强度折减率分别减小37.5%、50%和29.2%.冻融损伤延缓机理可以从两方面进行解释:一方面再生骨料细化了孔隙结构,减少了孔隙中可冻结水的含量,因而降低了水冻胀带来的破坏损伤;另一方面,细骨料之间具有良好的“互锁”(interlocking)效应,即骨料相互咬合,有效避免错动,从而限制裂缝的进一步开展.

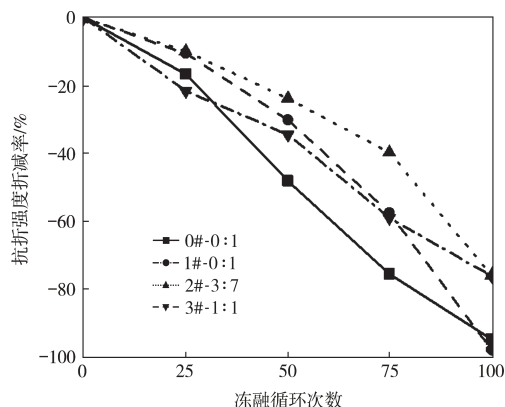


图9 抗折强度折减率随冻融循环次数的变化
Fig.9 The change of flexural strength reduction rate with the number of freeze-thaw cycles

2.2.2 质量损失强度分析






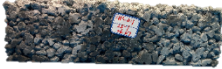














表6展示了再生骨料透水混凝土在冻融循环作用下的典型劣化特征.当冻融循环次数小于25次时,各组试样未出现骨料松动、剥落等现象,整体外观形貌保持完整.冻融循环次数增加至50次时,2#和3#因分别掺入了30%和50%的再生骨料,发现少量骨料剥落;0#和1#表面出现少量微裂缝,仍保持较好的完整性.冻融循环次数继续增加至75次,各组

试样均出现不同程度的破坏. 0#和3#试样表面出现较大裂缝,并伴随着块状骨料脱落和边缘破损;1#和2#裂缝数量增加,开裂深度变大,伴随少量骨料破

损.当冻融循环次数达到100次时,3#试样发生断裂破坏,其他组试样同样出现严重的边缘破损、块状骨料脱落等现象.

表6 冻融循环对试样整体性的影响

Tab.6 Effects of freeze-thaw cycles on the integrity of samples

冻融循环次数	0#-0:1	1#-0:1	2#-3:7	3#-1:1
0	 完好	 完好	 完好	 完好
25	 完好	 完好	 完好	 完好
50	 轻微破坏	 轻微破坏	 中等破坏	 中等破坏
75	 严重破坏	 严重破坏	 严重破坏	 严重破坏
100	 严重破坏	 严重破坏	 严重破坏	 严重破坏

注:根据试样外观完整性分为4个破坏阶段,完好:无裂缝或骨料剥落;轻微破坏:少量微裂缝和骨料松动;中等破坏:裂缝较多,少量骨料块状剥落;严重破坏:大量裂缝和骨料剥落.

图10所示为各组试样质量损失率随冻融循环次数的变化.在低水平冻融循环下,各组试样完整性良好,质量损失率较小;冻融次数超50次,随着再生骨料含量增加,质量损失增大;冻融次数达到100次时,0#和3#的质量损失超5%,发生冻融破坏.

2.2.3 动弹性模量分析

采用超声波法测得0#和1#的动弹性模量分别为18.9 GPa和14.4 GPa,加入再生细骨料测得2#和

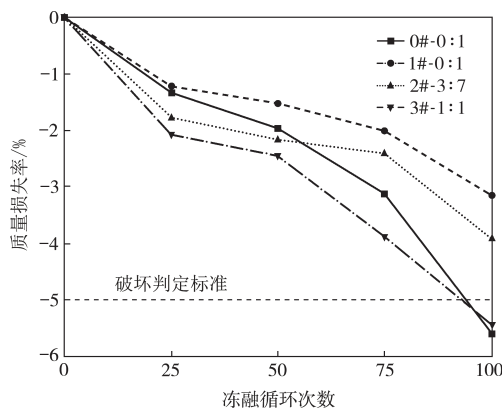


图10 质量损失率随冻融循环次数的变化

Fig.10 The change of mass loss rate with the number of freeze-thaw cycles

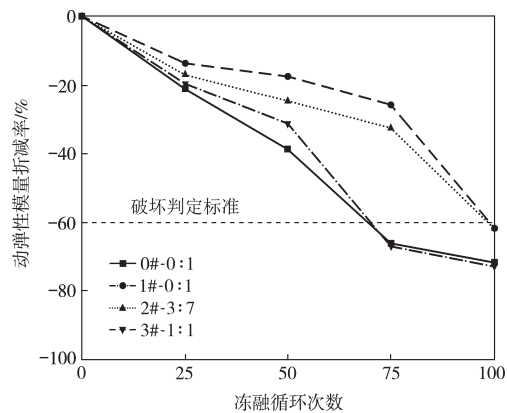


图11 动弹性模量折减率随冻融循环次数的变化

Fig.11 The change of dynamic elastic modulus reduction rate with the number of freeze-thaw cycles

3#的动弹性模量均为11.9 GPa,降低了约17.3%,降幅与张志权等^[39]研究结果一致.图11所示为各组试样动弹性模量折减率随冻融循环次数的变化.对比0#和1#可知,在低水平冻融条件下,高性能水泥基体提高了抗冻性能,避免了动弹性模量过早损失.另外,由2#和3#可知,加入再生骨料细化了孔隙结构,降低了孔隙水含量,延缓了动弹性模量损失.当冻融

循环次数超过50次时,动弹性模量迅速丧失,试样破坏失效。

对比图10、图11可知,根据质量损失率和动弹性模量折减率评价冻融耐久性具有差异性。前者表征了试样在冻融作用下保持完整性的能力,不能反映内部的损伤,具有一定的滞后性;后者可以通过动弹性模量的变化反映内部微损伤发展程度。

3 结论

本研究采用单纯形重心设计法对胶凝材料进行优化设计,确定了高性能胶凝材料中水泥、粉煤灰、硅灰最佳质量分数分别为55%、30%和15%。分析了高性能胶凝材料和再生骨料含量对再生骨料透水混凝土力学性能、渗透性和耐久性影响,主要结论如下:

1) 高性能水泥基体可以显著提升再生骨料透水混凝土力学性能。再生骨料质量分数为0%、30%和50%时,基于高性能水泥基体的再生骨料透水混凝土抗压强度分别为26.9 MPa、31.2 MPa和22.5 MPa,相较于普通水泥基材,分别提升72.4%、100%和44.2%。在满足不同场景对力学性能和渗透性需求的同时,实现了再生骨料的高比例掺入,有利于促进建筑垃圾资源化利用。

2) 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。当不含再生骨料时,仅发生ITZ破坏;含少量再生骨料时发生混合模式破坏,即同时存在ITZ破坏和骨料破坏;再生骨料超过50%时,仅发生骨料破坏。

3) 在同一冻融循环水平下,随着再生细骨料的增加,质量损失率增大。少量的再生细骨料可以有效延缓冻融损伤的发展,且不会明显降低透水混凝土的渗透性。

参考文献

- [1] 魏英烁,姬国强,胡力群.建筑垃圾回收再利用研究综述[J].硅酸盐通报,2019,38(9):2842-2846.
WEI Y S,JI G Q,HU L Q. Research summary on recycling of construction waste[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2019,38(9):2842-2846. (in Chinese)
- [2] 张军辉,丁乐,张安顺.建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J].中国公路学报,2021,34(10):135-154.
ZHANG J H,DING L,ZHANG A S. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering: a review[J]. China Journal of Highway and Transport,2021,34(10):135-154. (in Chinese)
- [3] 焦玉稳,孙绍荣.中国垃圾围城问题与发展策略探析[J].生态经济,2015,31(10):103-106.
JIAO Y W,SUN S R. The problems of Chinese garbage siege and development strategies[J]. Ecological Economy,2015,31(10):103-106. (in Chinese)
- [4] DIETZ M E. Low impact development practices: a review of current research and recommendations for future directions[J]. Water, Air, and Soil Pollution,2007,186(1/2/3/4):351-363.
- [5] CHANDRAPPA A K,BILIGIRI K P. Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete: a hydrodynamic approach[J]. Construction and Building Materials,2016,123:627-637.
- [6] KIM G M,JANG J G,KHALID H R, et al. Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates[J]. Construction and Building Materials,2017,136:1-8.
- [7] HOLMES R R,HART M L,KEVERN J T. Enhancing the ability of pervious concrete to remove heavy metals from stormwater[J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment,2017,3(2):04017004.
- [8] CHANDRAPPA A K,BILIGIRI K P. Pervious concrete as a sustainable pavement material-research findings and future prospects: a state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials,2016,111:262-274.
- [9] SUN R,WANG D,CAO H, et al. Ecological pervious concrete in revetment and restoration of coastal Wetlands: a review[J]. Construction and Building Materials,2021,303:124590.
- [10] YANG J,JIANG G. Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials[J]. Cement and Concrete Research,2003,33(3):381-386.
- [11] LIU T,WANG Z,ZOU D, et al. Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method[J]. Cement and Concrete Research,2019,122:72-82.
- [12] 李佳彬,肖建庄,孙振平.再生粗骨料特性及其对再生混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2004(4):390-395.
LI J B,XIAO J Z,SUN Z P. Properties of recycled coarse aggregate and its influence on recycled concrete[J]. Journal of Building Materials,2004(4):390-395. (in Chinese)
- [13] ZAETANG Y,SATA V,WONGSA A, et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate[J]. Construction and Building Materials,2016,111:15-21.
- [14] 陈守开,常承艳,郭磊,等.再生骨料掺量对透水混凝土性能的影响[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(1):98-108.
CHEN S K,CHANG C Y,GUO L, et al. Influence of recycled aggregates content on the performance of pervious concrete[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2018,26(1):98-108. (in Chinese)
- [15] LI Y,YANG J R,GUO T T. The study of convertibility of water cement ratio in recycled water permeable concrete[J]. Advanced Materials Research,2011,250/251/252/253:218-221.
- [16] 王靖,刘钦焱,蔡鹏,等.再生骨料透水混凝土的性能及影响因素研究[J].新型建筑材料,2018,45(9):42-46.
WANG J,LIU Q Y,CAI P, et al. Experimental study on proper-

- ties and influencing factors of recycled aggregate pervious concrete [J]. *New Building Materials*, 2018, 45(9): 42–46. (in Chinese)
- [17] ČOŠIĆ K, KORAT L, DUCMAN V, et al. Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 78: 69–76.
- [18] 梁凯, 朱惠英, 陈正, 等. 基于正交试验的再生骨料透水混凝土性能影响研究[J]. *混凝土*, 2020(4): 134–137.
LIANG K, ZHU H Y, CHEN Z, et al. Study on the performance of recycled aggregate pervious concrete based on orthogonal test [J]. *Concrete*, 2020(4): 134–137. (in Chinese)
- [19] GÜNEYISI E, GESOĞLU M, KAREEM Q, et al. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(1): 521–536.
- [20] RIZVI R, TICHE S, HENDERSON V, et al. Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement [J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2164(1): 132–140.
- [21] 王佶, 张岩, 彭自强, 等. 水泥浆体性能对再生骨料透水混凝土成型和透水性能的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2018, 40(3): 48–52.
WANG J, ZHANG Y, PENG Z Q, et al. Relationship between cement paste characteristics and recycled aggregate porous concrete [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2018, 40(3): 48–52. (in Chinese)
- [22] ADIL G, KEVERN J T, MANN D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118453.
- [23] 李玉平, 王伟, 章鹏, 等. 矿物掺合料对页岩陶粒混凝土抗压强度的影响[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(6): 72–77.
LI Y P, WANG W, ZHANG P, et al. Influence of mineral admixture addition on compressive strength of shale ceramsite concrete [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(6): 72–77. (in Chinese)
- [24] SHEN P, LU J, ZHENG H, et al. Conceptual design and performance evaluation of high strength pervious concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121342.
- [25] ZHONG R, WILLE K. Compression response of normal and high strength pervious concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 109: 177–187.
- [26] 透水水泥混凝土路面技术规程:CJJ/T 135—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 6–7.
Technical specifications for pervious concrete pavement: CJJ/T 135—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 6–7. (in Chinese)
- [27] WU Z, SHI C, HE W. Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 136: 307–313.
- [28] 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: 25.
Technical specification for application of recycled aggregate pervious concrete: CJJ/T 253—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 25. (in Chinese)
- [29] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 18–19.
Standard for method of test mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 18–19. (in Chinese)
- [30] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 10–14.
Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 10–14. (in Chinese)
- [31] Standard test method for pulse velocity through concrete: C 597 [S]. Philadelphia: ASTM, 2009.
- [32] CHANDRAPPA A K, BILIGIRI K P. Influence of mix parameters on pore properties and modulus of pervious concrete: an application of ultrasonic pulse velocity [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(12): 5255–5271.
- [33] TOGHROLI A, MEHRABI P, SHARIATI M, et al. Evaluating the use of recycled concrete aggregate and pozzolanic additives in fiber-reinforced pervious concrete with industrial and recycled fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 118997.
- [34] SHANNAG M J. High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2000, 22(6): 399–406.
- [35] RAO G A. Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(11): 1765–1770.
- [36] VÁZQUEZ-RIVERA N I, SOTO-PÉREZ L, ST JOHN J N, et al. Optimization of pervious concrete containing fly ash and iron oxide nanoparticles and its application for phosphorus removal [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 22–28.
- [37] ZHONG R, WILLE K. Material design and characterization of high performance pervious concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 51–60.
- [38] MAZLOOM M, RAMEZANIANPOUR A A, BROOKS J J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26(4): 347–357.
- [39] 张志权, 刘云霄. 再生黏土砖骨料含量对透水混凝土性能的影响[J]. *混凝土*, 2017(8): 123–127.
ZHANG Z Q, LIU Y X. Influence of recycled clay brick aggregate content on the properties of pervious concrete [J]. *Concrete*, 2017(8): 123–127. (in Chinese)