

# 纤维改性再生骨料透水混凝土力学性能透水性和耐磨性研究

郭磊<sup>1,2,3</sup>, 刘思源<sup>1,3</sup>, 陈守开<sup>1,2,3\*</sup>, 汪伦焰<sup>1,2,3</sup>, 薛志龙<sup>1,2,3</sup>

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450045; 2. 河南省水环境治理与生态修复院士工作站, 郑州 450002;  
3. 河南省水环境模拟与治理重点实验室, 郑州 450002)

**摘要:** 再生骨料透水混凝土是利用再生骨料制备透水混凝土, 具备再生混凝土和透水混凝土的功能优势, 但导致强度、耐磨性变差, 故该文进行再生骨料透水混凝土改性研究。将聚丙烯纤维和碳纤维以不同的体积分数 (其中聚丙烯纤维掺量分别为 0.3%、0.6%、0.9%、1.2%, 碳纤维掺量分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%) 掺入再生透水混凝土中, 采用 WAW-1000 电液伺服万能试验机测定力学强度, 自制透水装置测定透水系数, 洛杉矶磨耗试验机测定耐磨性, 获取不同种类和掺量纤维对透水性、力学性能和耐磨性的影响。试验结果表明, 聚丙烯纤维和碳纤维的掺入对混凝土的孔隙率和透水系数影响不大, 但可提高强度和耐磨性。随着纤维掺量的增加, 抗压强度和劈裂抗拉强度呈先增大后减少的趋势; 质量损失率也先减少后增大趋势。经优化分析可知聚丙烯纤维最优掺量为 0.6%, 碳纤维最优掺量为 0.4%。该成果可为纤维改性混凝土以及再生骨料透水混凝土的推广应用提供参考。

**关键词:** 混凝土; 纤维; 再生骨料; 透水混凝土; 力学性能; 耐磨性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.020

中图分类号: TU528.04

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0153-08

郭磊, 刘思源, 陈守开, 汪伦焰, 薛志龙. 纤维改性再生骨料透水混凝土力学性能透水性和耐磨性研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 153—160. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.020 <http://www.tcsae.org>

Guo Lei, Liu Siyuan, Chen Shoukai, Wang Lunyan, Xue Zhilong. Research on mechanical properties, permeability and abrasion resistance of fibers modified recycled aggregate pervious concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 153—160. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.020 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

透水混凝土 (pervious concrete, PC), 又称多孔混凝土, 通常由水泥、水、粗骨料 (少或无细骨料) 组成, 与常规混凝土相比, 空隙率大, 透水性高, 具有很好的透水、抗噪性能, 广泛用于地下停车场、机场跑道、公园路面。用于透水路面的透水混凝土通常具有尺寸为 2~8 mm 的孔隙, 孔隙率为 18%~35%, 抗压强度相对较低, 仅为 2.8~28.0 MPa<sup>[1]</sup>, 水泥浆粘结层非常薄, 故混凝土的强度主要取决于胶结料水泥浆的强度<sup>[2]</sup>。由于骨料强度通常高于水泥浆和水泥浆与骨料之间的结合面, 因此可适当降低骨料强度, 即采用再生骨料作为粗骨料, 并获得与天然骨料制成的透水混凝土类似的性能<sup>[3-7]</sup>。再生骨料透水混凝土 (recycled aggregate pervious concrete, RAPC), 既能将建筑垃圾回收利用, 又能减少城市的积水, 降低城市的噪音和热岛效应, 符合可持续发展的理念, 还能应用于海绵城市的建设, 具有重要的社会 and 经济效益<sup>[8]</sup>。

RAPC 作为一种新型的生态混凝土, 近年来国内外学者开展了对其孔隙率、透水系数、强度以及耐久性的研究。Otani 等<sup>[9]</sup>研究了 4 种不同骨料下透水混凝土的强度, 结果表明, 透水混凝土的强度受骨料密度的影响, 在给定的孔隙率下, 使用低模量骨料体会显著降低抗压强度。Sata 等<sup>[10]</sup>研究结果表明, 含再生骨料 (recycled aggregate, RA) 的透水混凝土比含天然骨料 (natural aggregate, NA) 的力学性能较差。Gaedicke 等<sup>[11]</sup>研究了在磨细粒状高炉矿渣不同替代水平下天然和再生骨料透水混凝土的耐磨性, 评估了旋转切割和冲击磨擦 2 种试验方法在透水混凝土耐磨性测定中的有效性。Zhang 等<sup>[12]</sup>发现骨料的压碎指标的增加对 RAPC 的抗压强度、弹性模量、抗弯强度和冻融耐久性有显著影响, 但对 RAPC 渗透系数和总空隙率的影响可以忽略不计。Zaetang 等<sup>[13]</sup>利用 2 种再生骨料 (concrete block aggregate, RBA 和 recycled concrete aggregate, RCA) 替代天然骨料, 发现除了在 100% 的替代水平之外, RBA 和 RCA 都提高了透水混凝土的抗压强度, 且 RCA 在所有替代水平上都提高了耐磨性, 而 RBA 只有在 20% 的替代水平时耐磨性才得到改善。

由于再生骨料在机械破碎过程产生微裂纹, 再生骨料表面的旧砂浆与新拌水泥浆体粘结不牢固, 存在界面薄弱区, 因此由再生骨料制得的透水混凝土强度普遍较低。而纤维具有抗拉强度高, 阻止开裂作用, 能够显著提高混凝土的韧性, 是防止微裂纹和裂纹扩展以及补偿

收稿日期: 2018-08-02 修订日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (51679092); 国家自然科学基金青年基金项目 (51309101); 河南省重大科技攻关项目 (172102210372); 河南省产学研合作项目 (182107000031)

作者简介: 郭磊, 博士, 副教授, 研究方向: 混凝土材料试验及水工混凝土结构数值仿真。Email: glboss@126.com

\*通信作者: 陈守开, 博士, 副教授, 研究方向: 水工结构设计。

Email: man200177@163.com

混凝土抗拉强度弱点的有效手段<sup>[14]</sup>。虽然采用纤维对普通混凝土改性已应用于工程,但采用纤维对再生骨料透水混凝土改性还停留在初步研究阶段。Hesami 等<sup>[15]</sup>研究了体积掺量为 0.2% 的玻璃纤维、0.5% 的钢纤维和 0.3% 的聚苯硫醚纤维对透水混凝土力学性能的影响,在水灰比为 0.33 时,相较于对照组(无纤维),抗压强度分别提高了 46%、40% 和 50%,抗拉强度分别提高了 28%、33% 和 37%,抗弯强度分别提高了 17%、19% 和 21%。Rangelov 等<sup>[16]</sup>将固化碳纤维复合材料(cured carbon fiber composite material, CCFCM)的不同尺寸片段以 3 个体积分数掺入透水混凝土混合物中,与对照组相比,掺入 CCFCM 后透水混凝土呈现更高的渗透速率,同时观察到在 28 d 抗压强度、7 d 抗拉强度和弹性模量力学性能中的改善,分别提高了 4%~11%, 11%~46% 和 6%~45%。

为改善再生骨料透水混凝土的性能,本文采用聚丙烯纤维和碳纤维对混凝土进行改性研究,测定在聚丙烯纤维和碳纤维不同掺量下再生透水混凝土的力学性能、透水性能、耐磨性能,以期获得聚丙烯纤维和碳纤维在再生骨料透水混凝土中的最优掺量。

1 材料与方法

1.1 原材料

1.1.1 粗骨料

本次试验采用单级配,选取天然骨料和再生骨料,其中 RA 取自废弃混凝土路面,经颚式破碎机和人工破碎后,并由人工筛分和机器筛分,得到粒径 10~20mm 的再生粗骨料。由天然骨料制备的透水混凝土为天然对照组,由再生骨料制备且不掺入纤维的透水混凝土为再生对照组。骨料的性能指标见表 1。

1.1.2 水泥和水

水泥选择 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,生产厂家为河南风博天瑞水泥有限公司,性能指标见表 2。试验拌合用水为自来水。

表 1 天然骨料和再生骨料的基本性能

Table 1 Basic properties of natural aggregate and recycled aggregate

骨料类型 Aggregate type	粒径 Size range/mm	含水率 Water content/%	10 min 吸水率 10 min water absorption/%	表观密度 Apparent density/(kg·m <sup>-3</sup> )	空隙率 Void ratio/%	压碎指标 Crushing index/%
天然骨料 Natural aggregate	10~20	0.2	0.13	2 727	41.36	9.53
再生骨料 Recycled aggregate	10~20	4.23	0.6	2 609	47.07	15.54

表 2 水泥的基本性能

Table 2 Basic properties of cement

比表面积 Specific surface area/(m <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup> )	初凝时间 Initial setting time/min	终凝时间 Final setting time/min	3 d 抗折强度 3 d flexural strength/MPa	3 d 抗压强度 3 d compressive strength/MPa	安定性 Soundness
348.7	176	244	5.9	29.6	合格

1.1.3 纤维

聚丙烯纤维厂家为廊坊德凯保温材料销售有限公司,碳纤维厂家为沧州中丽新材料科技有限公司,性能指标见表 3。

表 3 聚丙烯纤维和碳纤维性能

Table 3 Properties of polypropylene fiber and carbon fiber

纤维类型 Fiber type	长度 Length/mm	密度 Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗拉强度 Tensile strength/MPa	拉伸模量 Tensile modulus/GPa	断裂伸长率 Elongation at break/%
聚丙烯纤维 Polypropylene fiber	6	0.91	556.9	4.09	29.8
碳纤维 Carbon fiber	6	1.82	4651	230	2.02

1.2 试验设计

为研究聚丙烯纤维和碳纤维对再生骨料透水混凝土的影响,设置不掺纤维空白对照组和不同掺量聚丙烯纤维试验组、碳纤维试验组,纤维以体积百分比掺入再生透水混凝土,掺量参照文献<sup>[15]</sup>设计,配合比设计见表 4。

表 4 透水混凝土配合比设计

Table 4 Mix proportions of pervious concrete

试件类型 Sample type	试件编号 Sample code	水灰比 Water cement ratio	骨料 Aggregate/(kg·m <sup>-3</sup> )		水泥 Cement/(kg·m <sup>-3</sup> )	水 Water/(kg·m <sup>-3</sup> )	纤维掺量 Fiber content/%	
			天然骨料 Natural aggregate	再生骨料 Recycled aggregate			聚丙烯纤维 Polypropylene fiber	碳纤维 Carbon fiber
NAPC	NAPC	0.3	1 474.14	0	327.59	98.28	0	0
RAPC	RAPC	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0	0
PRPC	PRPC1	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0.3	0
	PRPC2	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0.6	0
	PRPC3	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0.9	0
	PRPC4	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	1.2	0
CRPC	CRPC1	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0	0.2
	CRPC2	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0	0.4
	CRPC3	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0	0.6
	CRPC4	0.3	0	1 474.14	327.59	98.28	0	0.8

注: NAPC 为天然骨料透水混凝土; RAPC 为再生骨料透水混凝土; PRPC 为聚丙烯纤维再生骨料透水混凝土; CRPC 为碳纤维再生骨料透水混凝土,下同。  
Note: NAPC represents natural aggregate pervious concrete; RAPC represents recycled aggregate pervious concrete; PRPC represents polypropylene fiber recycled aggregate pervious concrete; CRPC represents carbon fiber recycled aggregate pervious concrete, the same as below.

### 1.3 试验方法

首先将称取的骨料和纤维放入卧轴搅拌机中搅拌 50s, 使纤维与骨料混合均匀, 考虑到再生骨料的吸水率较大, 先加入 40% 的水预湿骨料, 搅拌 50 s, 再加入水泥搅拌 60 s, 然后加入剩余的水量搅拌 60 s, 模具为 150 mm×150 mm×150 mm 的标准立方体试块和 100 mm×200 mm 的圆柱体试块, 分 2 层装料, 每层插捣 25 下, 并置于振动台上振捣 1 次。在室温下 24 h 成型后拆模, 置于标准养护室养护 28 d, 选取相应的试块分别做抗压试验, 劈裂抗拉试验, 孔隙率试验, 透水试验以及耐磨试验。

#### 1.3.1 抗压强度试验

抗压强度试验根据 ASTM C39/C39M 标准进行<sup>[17]</sup>, 试验仪器为 WAW-1000 电液伺服万能试验机, 测试龄期为 28 d, 加载速率为 0.20 MPa/s。试验结果取 3 个 100 mm×200 mm 圆柱体试样的平均值。

#### 1.3.2 劈裂抗拉强度试验

劈裂抗拉强度试验根据 ASTM C496/C496M 标准进行<sup>[18]</sup>, 试验仪器为 WAW-1000 电液伺服万能试验机, 测试龄期为 28 d, 加载速率为 1.2 MPa/min。试验结果取 3 个 100 mm×200 mm 圆柱体试样的平均值。

#### 1.3.3 连续孔隙率测定

参照 CJJ/T253-2016《再生骨料透水混凝土应用技术规程》测定连续孔隙率<sup>[19]</sup>, 将 150 mm×150 mm×150 mm 试块从养护室取出放入 (105±5) °C 的烘箱中烘至质量恒定, 取出冷却至室温, 用直尺量出试件的尺寸, 并计算出其体积  $V$ 。将试件完全浸泡在水中, 待无气泡出现时测量试件在水中的质量  $m_1$ 。取出试件, 放在 60 °C 烘箱中烘 24 h 后称量试件的质量  $m_2$ 。试块的孔隙率按式 (1) 计算。

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

式中  $C$  为试块的孔隙率, %;  $m_1$  为试件在水中的质量, g;  $m_2$  为试块在烘箱中烘 24 h 后的质量, g;  $\rho$  为水的密度, g/cm<sup>3</sup>;  $V$  为试块的体积, cm<sup>3</sup>。

#### 1.3.4 透水系数测定

参照 CJJ/T 135-2009《透水水泥混凝土路面技术规程》<sup>[20]</sup>, 采用固定水头法测定透水系数, 自制透水装置如图 1 所示。



图 1 自制透水测定装置

Fig.1 Self-made permeation equipment

将成型的 150 mm×150 mm×150 mm 试块侧面涂抹水泥, 放入装置后用橡皮泥将试块四周的缝隙进行密封,

确保水流仅从试块表面渗透。打开供水阀门, 使水流通过试块表面进入装置中, 等装置底部溢流孔有水流流出时, 调整进水量, 使透水装置内保持一定的水位, 待进水口与溢流孔的流量稳定后, 用量筒从出水口接水, 记录相应时间内流出的水量, 测量 3 次, 取平均值。透水系数  $K$  可由式 (2) 计算。

$$K = \frac{Q \cdot L}{H \cdot A \cdot t} \quad (2)$$

式中  $K$  为透水系数, cm/s;  $Q$  为透水量, ml;  $L$  为透水混凝土试块的高度, cm;  $H$  为水头差, cm;  $A$  为透水混凝土试块的表面积, cm<sup>2</sup>;  $t$  为透水时间, s。

#### 1.3.5 耐磨性试验

根据 ASTM C1747/ C1747M<sup>[21]</sup>标准进行耐磨试验, 将成型的 3 个 100 mm×200 mm 圆柱体试块取出, 称得质量  $W_1$ , 放入洛杉矶磨耗机中以 30 r/min 的速率旋转 500 转, 如图 2 所示。取出剩余试块过筛 19.5 mm, 水洗后称得剩余质量  $W_2$ , 根据公式 (3) 计算质量损耗率。

$$S = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $W_1$  为磨损前的原始质量, kg;  $W_2$  为磨损后的剩余质量, kg;  $S$  为质量损耗率, %。



图 2 洛杉矶磨耗试验机

Fig.2 Los Angeles abrasion machine

## 2 结果与分析

通过试验测得透水混凝土的连续孔隙率、透水系数、抗压强度、劈裂抗拉强度和 质量损耗率, 结果如表 5 所示。

表 5 透水混凝土试验结果

Table 5 Pervious concrete experiment results

试件 Specimen	连续孔隙率 Continuous porosity/%	透水系数 Permeability coefficient/ (mm·s <sup>-1</sup> )	抗压强度 Compressive strength/ MPa	劈裂 抗拉强度 Splitting tensile strength/MPa	质量损耗率 Mass loss ratio/%
NAPC	22.0	4.13	6.24	1.60	26.11
RAPC	20.0	4.00	8.07	1.31	29.05

从表 5 来看, 再生骨料透水混凝土的连续孔隙率和透水系数均低于天然骨料透水混凝土, 这是因为再生骨料表面粗糙有少量微裂纹, 且内部缺陷多, 在拌合过程中容易破碎产生少量细小颗粒, 增加的小颗粒堵塞了再生骨料之间的孔隙, 从而导致连续孔隙率的降低。

虽然再生骨料的密度低、压碎指标大且本身强度较低, 从表知, 再生骨料透水混凝土的抗压强度为 8.07 MPa,

天然骨料透水混凝土抗压强度为 6.24MPa, 增大率为 29.33%, 再生骨料透水混凝土抗压强度大于天然骨料透水混凝土抗压强度, 这是因为经破碎获得的再生骨料表面粗糙, 能更好地和水泥浆接触, 增大水泥包裹骨料及骨料之间接触的面积, 因而抗压强度增大。从表 5 可知, 再生骨料透水混凝土的劈裂抗拉强度较天然骨料透水混凝土劈裂抗拉强度减少 18.12%, 这是由于再生骨料在机械破碎过程中产生了微小裂纹, 微裂纹的存在使得混凝土受到拉应力时容易产生破坏<sup>[22-25]</sup>。

由于再生骨料的性能低于天然骨料, 使用再生骨料的透水混凝土的质量损耗率高于天然骨料透水混凝土, 增大率为 11.26%, 即其耐磨性能低于天然骨料透水混凝土。

## 2.1 纤维对再生透水混凝土透水性能的影响

透水性是透水混凝土的一项重要物理特性, 用于城市道路、机场跑道、地下停车场时其透水性需满足工程应用要求。连续孔隙率和透水系数是表征其透水性的主要技术指标, 这里考察掺入不同体积分数的纤维的透水混凝土连续孔隙率和透水系数的变化, 以期确定纤维最优掺量。

### 2.1.1 连续孔隙率

透水混凝土的孔隙包括连续孔隙和封闭孔隙, 对透水起作用的只是连续孔隙, 目前国内外对孔隙率的测定也只是对连续孔隙及半封闭孔隙进行测定, 而透水混凝土的孔隙率主要受骨料种类、粒径及级配的影响<sup>[26]</sup>, 骨料粒径越大、类型单一及单级配时, 孔隙率相对较大。图 3 为纤维掺量对连续孔隙率的影响。

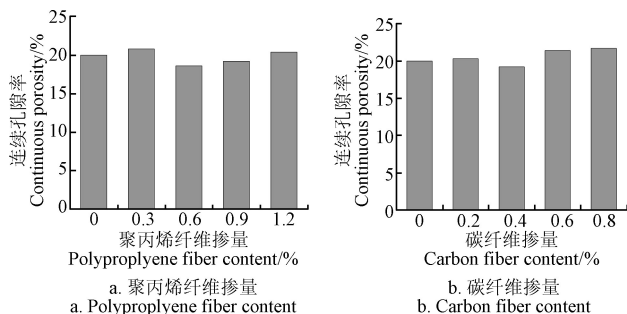


图 3 纤维掺量对连续孔隙率的影响

Fig.3 Effect of fiber content on its continuous porosity

如图 3 所示, 掺入纤维后, 混凝土的孔隙率在一定范围内变化, 但变化幅度不大, 含聚丙烯纤维变幅最大值仅为 11.8%; 含碳纤维变幅最大值仅为 13.1%。产生此现象的原因是纤维占用了透水混凝土连通孔隙的一部分体积, 致使连续孔隙率降低, 但同时硬化的混凝土中, 纤维与水泥基界面的粘结力相对较差, 水分在压力作用下, 易进入纤维与基界面, 致使接口处相互连通, 致使连续孔隙率增加。由于纤维的掺量总体上较小, 掺入纤维后对混凝土的孔隙率影响有限。根据试验结果, 含聚丙烯纤维再生透水混凝土连续孔隙率范围为 18.6%~20.8%, 含碳纤维再生透水混凝土连续孔隙率范围为 19.2%~21.7%, 根据《透水水泥混凝土路面技术规程》规定, 连续孔隙率不得低于 10%, 故所获连续孔隙率均在合理的范围内。

### 2.1.2 透水系数

混凝土的透水系数一般取决于连续孔隙率的大小, 如图 4 所示, 掺入纤维后, 透水系数改变, 这可能是因为在硬化的混凝土中, 水分子在压力作用下, 易进入纤维与水泥基界面, 致使接口处形成相互连通的通道, 透水系数因此增加, 当纤维的掺入占用骨料之间的连续孔隙, 堵塞了水流通道的时, 透水系数反而有所降低。总体来看, 随着纤维掺量的改变, 透水系数变化范围不大, 掺入聚丙烯纤维的透水系数为 3.87~4.17 mm/s, 掺入碳纤维的透水系数为 4.02~4.16 mm/s, 《透水水泥混凝土路面技术规程》中规定透水系数不低于 0.5 mm/s, 故满足透水混凝土路面的应用要求。

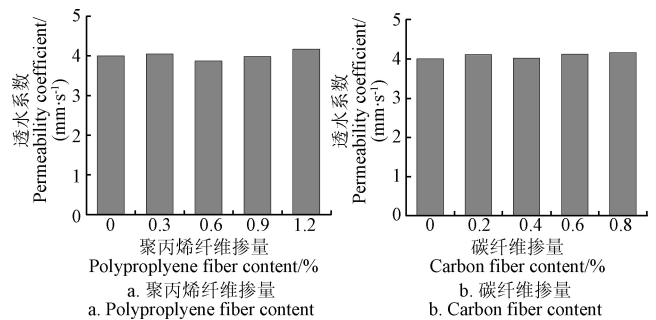
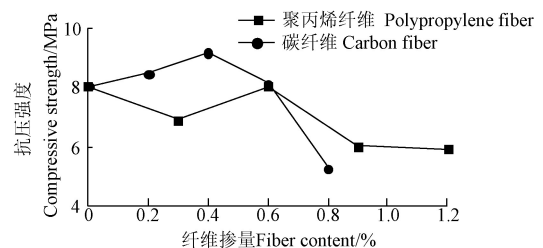


图 4 纤维掺量对透水系数的影响

Fig.4 Effect of fiber content on permeability coefficient

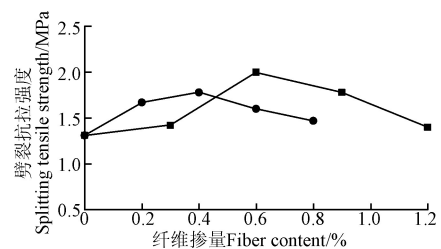
## 2.2 纤维对再生透水混凝土力学性能影响

图 5 为纤维对抗压强度和劈裂抗拉强度的影响。



a. 纤维对抗压强度的影响

a. Effect of fibers on compressive strength



b. 纤维对劈裂抗拉强度的影响

b. Effect of fibers on splitting tensile strength

图 5 纤维对抗压强度和劈裂抗拉强度的影响

Fig.5 Effect of fibers on compressive strength and splitting tensile strength

由图 5a 可知, 掺聚丙烯纤维试块的抗压强度均较再生对照组抗压强度低。而碳纤维的掺入则使得试块抗压强度高低不一, 0.2%~0.6%掺量碳纤维试块的抗压强度较再生对照组抗压强度略有增加, 且在掺量为



0.4%, 抗压强度最大, 为 9.20 MPa, 较再生对照组提高 14%。这主要是由于掺入短而细且均匀分布的纤维后, 纤维与水泥基复合材料包裹或填充再生粗骨料表面, 增强骨料颗粒之间的黏结作用, 由于混凝土的抗拉强度和极限拉应变相对较低, 混凝土在约束状态下极易发生裂缝, 而纤维的阻裂效应<sup>[27-30]</sup>, 限制了混凝土内部裂缝的产生和发展, 为混凝土抵抗应变而产生的拉应力分担应力份额。

由图 5b 可知, 随着纤维掺量的增加, 劈裂抗拉强度先升高后降低。对于聚丙烯纤维, 在 0.6% 的掺量下, 劈裂抗拉强度达到最大值 2.00 MPa, 较再生对照组提高 52.67%。对于碳纤维, 在 0.4% 的掺量下, 劈裂抗拉强度达到最大值 1.78 MPa, 较再生对照组提高 35.88%, 相比之下, 聚丙烯纤维对再生骨料透水混凝土劈裂抗拉强度的改善优于碳纤维。再生骨料透水混凝土抗压强度提高的幅度小于劈裂抗拉强度, 主要是由于混凝土内部存在不同尺度的微裂缝, 而微裂缝对抗拉强度的影响远大于抗压强度, 由于纤维对微裂缝的产生和扩展有很好的抑制作用, 因此纤维对再生透水混凝土的抗拉强度的改善高于抗压强度。

### 2.3 纤维对再生透水混凝土耐磨性能的影响

耐磨性能是衡量混凝土路面性能的一个重要指标, 主要取决于混凝土强度、骨料性能及面层混凝土质量。本文对表 4 中 10 个配比, 共 30 个试块进行磨耗试验, 以碳纤维掺量 0.4% 时为例 (图 6), 给出从试块冲击磨耗前后对比图, 观察磨损后的局部放大图, 可以清楚看到碳纤维附着在骨料表面, 有效地发挥了纤维的阻裂效应, 使混凝土在磨损过程中始终保持其整体性, 纤维的连结作用又使骨料之间不致于破损, 从而保证了混凝土内部结构的连续性, 而材料的整体性直接增强了其抵抗冲击磨损破坏的能力, 因此纤维掺入混凝土中, 对于提高混凝土本身的耐磨性有很大帮助。



a. 试块冲击磨损前  
a. Specimens before impact abrasion  
b. 试块冲击磨损后  
b. Specimens after impact abrasion

图 6 碳纤维掺量为 0.4% 的试块冲击磨损前后对比

Fig.6 Comparison of specimens containing 0.4% carbon fiber before and after impact abrasion

磨耗试验结果见图 7。由图 7 可知, 纤维的掺入使得耐磨性能得到改善, 且在各种掺量下的质量损耗率均低于未掺纤维组。聚丙烯纤维在 0.9% 的掺量下, 对再生透水混凝土耐磨性能的提升最高, 使质量损耗率较对照组降低 41.2%, 碳纤维的最优掺量为 0.4%, 质量损耗率较对照组降低 29.4%, 且聚丙烯纤维对耐磨性能的改善要优于碳纤维。

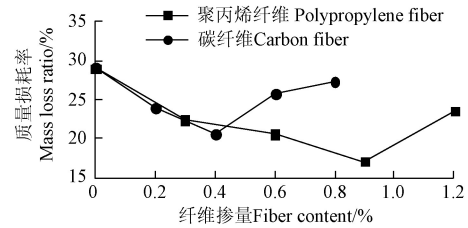


图 7 纤维对耐磨性能的影响

Fig.7 Effect of fibers on abrasion resistance

### 2.4 再生透水混凝土纤维最优掺量的确定

纤维最优掺量的再生透水混凝土应为性能最优的再生透水混凝土, 这是一个多目标优化的问题, 优化目标应为再生透水混凝土强度、透水性和耐磨性。求解多目标优化问题, 首先明确优化目标之间的关系, 采用目标函数加权求和法求解, 该方法的主要思想是通过优化问题中的每个子目标函数乘以一个权值, 然后对这些目标函数进行求和。用这样的方式就能够将对多目标问题变成一个单目标问题, 然后再用传统的数学方法对其求解。

因纤维掺量和强度之间为正相关性, 与质量损失率呈负相关性, 与透水性呈正相关性, 故纤维最优掺量优化模型见式 (4)。

$$\begin{aligned} & \max(f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x)) \\ & = \max(\omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) - \omega_3 f_3(x) + \omega_4 f_4(x) + \omega_5 f_5(x)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $f_1(x)$  为抗压强度, Mpa,  $f_2(x)$  为劈裂抗拉强度, Mpa,  $f_3(x)$  为质量损失率, %,  $f_4(x)$  为透水系数, cm/s,  $f_5(x)$  为连续孔隙率, %,  $x$  为掺量, %,  $\omega_i$  为权重, 且  $\sum_{i=1}^5 \omega_i = 1$ 。

权重的确定可通过纤维掺量对不同性能 (透水性、强度和耐磨性) 的敏感性程度分析得到, 这里敏感度为当自变量纤维掺量发生变化时所引起的因变量性能的变化率<sup>[31]</sup>。敏感性分析一般包括以下步骤: 1) 确定敏感性分析的指标, 这里选择典型再生透水混凝土性能的指标值, 透水系数, 连续孔隙率, 抗压强度, 劈裂抗拉强度和重量损失率; 2) 设定不确定因素及其变化幅度, 结合前面研究成果, 不确定因素为两种纤维掺量, 聚丙烯纤维掺量分别为 0.3%、0.6%、0.9%、1.2%, 碳纤维掺量分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8%; 3) 分析、计算不确定因素的变化对指标的影响程度即敏感度参数  $R$ , 计算式见式 (5); 4) 求出敏感因素, 具体是指各个不确定因素在相同变化幅度的条件下, 影响目标较大的因素。

$$R = \left| \frac{\Delta N}{N} \right| / \left| \frac{\Delta Y}{Y} \right| \quad (5)$$

式中  $\Delta Y/Y$  为影响因素的相对变化率,  $\Delta N/N$  为评价指标的相对变化率。

根据公式 (5) 计算聚丙烯纤维和碳纤维掺量对再生透水混凝土的力学性能、透水性能、耐磨性能的敏感度, 如表 6 所示。

表 6 敏感性分析结果  
Table 6 Sensitivity analysis results

性能指标 Performance index	敏感度系数 Sensitivity coefficient/%	
	聚丙烯纤维 Polypropylene fiber	碳纤维 Carbon fiber
透水系数 Permeability coefficient	7.75	3.48
连续孔隙率 Continuous porosity	11.83	13.02
抗压强度 Compressive strength	35.52	74.24
劈裂抗拉强度 Splitting tensile strength	42.86	21.09
质量损耗率 Mass loss ratio	112.48	33.61

从表 6 知, 聚丙烯纤维和碳纤维对再生透水混凝土性能敏感度影响一致, 掺量对强度指标 (抗压强度和劈裂抗拉强度) 和耐磨性指标 (质量损失率) 影响较大, 对透水性指标 (透水系数和连续孔隙率) 影响较小, 敏感度低于 13.02, 故透水系数和连续孔隙率权重可忽略, 基于上述结果确定  $\omega_1=\omega_2=\omega_3=1/3$ ,  $\omega_4=\omega_5=0$ 。通过公式 (4) 计算得到聚丙烯纤维最优掺量为 0.6%, 碳纤维最优掺量为 0.4%。

### 3 结 论

通过对纤维改善再生骨料透水混凝土性能的研究, 得出以下结论:

1) 再生骨料透水混凝土的孔隙率和透水系数主要受骨料粒径和级配影响, 纤维对其作用不大; 再生骨料透水混凝土的抗压强度大于天然骨料透水混凝土, 劈裂抗拉强度小于天然骨料透水混凝土; 使用再生骨料的透水混凝土的质量损耗率高于天然骨料透水混凝土, 即其耐磨性能低于天然骨料透水混凝土。

2) 聚丙烯纤维降低了再生骨料透水混凝土的抗压强度, 碳纤维提高了再生骨料透水混凝土的抗压强度, 两者均明显提高了再生骨料透水混凝土的劈裂抗拉强度; 聚丙烯纤维和碳纤维显著增强了再生骨料透水混凝土的耐磨性。

3) 通过聚丙烯纤维和碳纤维对再生透水混凝土性能的影响分析, 采用多目标优化和敏感度分析理论, 可得出聚丙烯纤维最优掺量为 0.6%, 碳纤维最优掺量为 0.4%。

#### [参 考 文 献]

- [1] ACI. Report on Pervious Concrete[R]. ACI Committee, 2010.
- [2] Rizvi R, Tighe S, Henderson V, et al. Evaluating the use of recycled concrete aggregate in pervious concrete pavement[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2164: 132—140.
- [3] 陈守开, 杨晴, 刘秋常, 等. 再生骨料透水混凝土强度及透水性试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 141—146.  
Chen Shoukai, Yang Qing, Liu Qiuchang, et al. Experiment

on strength and permeability of recycled aggregate pervious concrete[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 141—146. (in Chinese with English abstract)

- [4] 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 Shoukai, Chang Chengyan, Guo Lei, 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 with English abstract)
- [5] 李秋实, 何东坡. 天然与再生集料透水混凝土对比试验[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(1): 89—94.  
Li Qiushi, He Dongpo. Comparative study of porous concretes using natural and recycled aggregates[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41(1): 89—94. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孙家瑛, 梁山. 再生混凝土集料透水性混凝土性能研究及应用[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 747—750.  
Sun Jiaying, Liang Shan. Performance of recycled concrete aggregate porous cement concrete and its application[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 747—750. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈守开, 刘新飞, 郭磊, 等. 再生骨料掺配比再生透水混凝土性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1590—1598.  
Chen Shoukai, Liu Xinfei, Guo Lei, et al. Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1590—1598. (in Chinese with English abstract)
- [8] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [9] Otani T, Sato Y, Murakami K, et al. Study on an equation for predicting the compressive strength of porous concrete[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2005, 70(590): 25—30.
- [10] Sata V, Wongs A, Chindaprasit P. Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates[J]. Construction & Building Materials, 2013, 42(9): 33—39.
- [11] Gaedicke C, Marines A, Miankodila F. Assessing the abrasion resistance of cores in virgin and recycled aggregate pervious concrete[J]. Construction & Building Materials, 2014, 68: 701—708.
- [12] Zhang Zhiqun, Zhang Yufen, Yan Changgen, et al.

- Influence of crushing index on properties of recycled aggregates pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 135: 112—118.
- [13] Zaetang Y, Sata V, Wongs A, et al. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate[J]. Construction & Building Materials, 2016, 111: 15—21.
- [14] 张浩博, 杜晓青, 寇佳亮, 等. 再生骨料透水混凝土抗压性能及透水性能试验研究[J]. 实验力学, 2017(2): 247—256.
- Zhang Haobo, Du Xiaoqing, Kou Jialiang, et al. Experimental study of comprehensive and permeable performance of permeable concrete with recycled aggregate[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017(2): 247—256. (in Chinese with English abstract)
- [15] Hesami S, Ahmadi S, Nematzadeh M. Effects of rice husk ash and fiber on mechanical properties of pervious concrete pavement[J]. Construction & Building Materials, 2014, 53(4): 680—691.
- [16] Rangelov M, Nassiri S, Haselbach L, et al. Using carbon fiber composites for reinforcing pervious concrete[J]. Construction & Building Materials, 2016, 126: 875—885.
- [17] Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens: ASTM C39/C39M-2013[S]. 2013.
- [18] Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens: ASTM C496/C496M-2011[S]. 2011.
- [19] 再生骨料透水混凝土应用技术规程: CJJ/T 253-2016[S]. 2016.
- [20] 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135-2009[S]. 2009.
- [21] Standard Test Method for Determining Potential Resistance to Degradation of Pervious Concrete by Impact and Abrasion: ASTM C1747/C1747M-2013[S]. 2013.
- [22] 朱金春, 杨鼎宜, 张晓欢, 等. 再生透水混凝土中再生骨料掺量问题的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(10): 6—11.
- Zhu Jinchun, Yang Dingyi, Zhang Xiaohuan, et al. Study on the content of recycled aggregate in recycled aggregate pervious concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(10): 6—11. (in Chinese with English abstract)
- [23] 薛如政, 刘京红, 苗建伟, 等. 再生骨料透水混凝土性能的研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(4): 128—133.
- Xue Ruzheng, Liu Jinghong, Miao Jianwei, et al. Study on the performance of recycled aggregate permeable concrete[J]. Journal of Agricultura University of Hebei, 2017, 40(4): 128—133. (in Chinese with English abstract)
- [24] 蒋正武, 孙振平, 王培铭. 若干因素对多孔透水混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(5): 513—519.
- Jiang Zhengwu, Sun Zhenping, Wang Peiming. Effects of some factors on properties of porous pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(5): 513—519. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张朝辉, 王沁芳, 杨娟. 透水混凝土强度和透水性影响因素研究[J]. 混凝土, 2008(3): 7—9.
- Zhang Zhaohui, Wang Qinfang, Yang Juan. Influence factors of compressive strength and permeability of pervious concrete[J]. Concrete, 2008(3): 7—9. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张贤超, 尹健, 池漪. 透水混凝土性能研究综述[J]. 混凝土, 2010(12): 47—50.
- Zhang Xianchao, Yin Jian, Chi Yi. Summary of performance for pervious concrete[J]. Concrete, 2010(12): 47—50. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王娇娜. 透水性聚丙烯纤维混凝土试验研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2008.
- Wang Jiaona. Experimental Study on Pervious Concrete Mixing with Polypropylene Fiber[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张铁伦. 聚丙烯纤维混凝土早期收缩与抗裂性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- Zhang Yilun. Experimental Investigation on Early-age Shrinkage and Racking-resistance Property in Polypropylene Fiber-reinforced Concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李兆林, 石振武, 柳明亮. 不同种类聚丙烯纤维混凝土性能对比试验[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 292—296.
- Li Zhaolin, Shi Zhenwu, Liu Mingliang. Comparative experiment on concrete performance of different kinds of polypropylene fiber[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31): 292—296. (in Chinese with English abstract)
- [30] 满都拉. 聚丙烯纤维对再生粗集料透水性混凝土的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(3): 694—706.
- Man Dula. Effect of polypropylene fibers on the recycled coarse aggregate pervious concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(3): 694—706. (in Chinese with English abstract)
- [31] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

## Research on mechanical properties, permeability and abrasion resistance of fibers modified recycled aggregate pervious concrete

Guo Lei<sup>1,2,3</sup>, Liu Siyuan<sup>1,3</sup>, Chen Shoukai<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Lunyan<sup>1,2,3</sup>, Xue Zhilong<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Henan Academician Workstation of Water Environment Treatment and Ecological Remediation, Zhengzhou 450002, China;

3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Recycled aggregate pervious concrete are made by cement, water and recycled aggregates, which conforms to the concept of sustainable development, can be used to construction of the sponge city, and has important social and economic benefits. In order to study the application of fiber in recycled aggregate pervious concrete (RAPC), RAPC was prepared with waste prefabricated pavement concrete as the source of recycled aggregate, natural concrete pervious concrete (NAPC) was prepared as a comparison. Two series of fibers added in RAPC were designed, which contained 0.3%, 0.6%, 0.9%, 1.2% polypropylene fiber (PF), and 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% carbon fiber (CF) by volume fraction, respectively, RAPC without PF and CF showed as control group. With the experiment on test cubes under standard maintenance, compressive strength, splitting tensile strength, the continuous porosity, the permeability coefficient and the abrasion resistance were measured. The results showed that: 1) Compared with NAPC, the continuous porosity and permeability coefficient of RAPC are lower than those of NAPC, the compressive strength of RAPC has improved by 29.33%, the splitting tensile strength has reduced by 18.12%, the mass loss ratio of RAPC has improved by 11.26%; 2) By adding the fibers to RAPC, the continuous porosity with different volume fractions of fibers varies in a certain range. The continuous porosity of RAPC containing PF ranges from 18.6% to 20.8%, and that of RAPC containing CF ranges from 19.2% to 21.7%. In general, the permeability coefficient changes in a small rang with the changing of fiber content. The permeability coefficient of RAPC with PF ranges from 3.87-4.17 mm/s, and the permeability coefficient of RAPC containing CF ranges from 4.02 - 4.16 mm/s. The effects of PF and CF on the continuous porosity and permeability coefficient of RAPC are similar. 3) By adding PF in RAPC, compressive strength of RAPC is lower than that of control group. By adding CF in RAPC, compressive strength of RAPC increased first and then decreased with the increase of CF content. When the amount of CF up to 0.4%, the compressive strength reached a maximum value of 9.2 MPa which is higher than 14% that of control group. The splitting tensile strength increased first and then decreased with the increase of fiber content. For PF, when the amount of PF up to 0.6%, the compressive strength reached a maximum value of 2.0 MPa which is higher than that of control group (52.67%). For carbon fiber, when the amount of CF up to 0.4%, the compressive strength reached a maximum value of 1.78 MPa which is higher than that of control group (35.88%). 4) PF is better than CF for improving abrasion resistance. When the amount of PF up to 0.9%, the abrasion resistance reached a minimum value, which is lower than that of control group (41.2%). When the amount of CF up to 0.4%, the abrasion resistance reached a minimum value which is lower than that of control group (29.4%). 5) With the application of optimization theory, the optimum amount of PF in RAPC is 0.6%, and the optimal amount of CF in RAPC is 0.4%. The results can provide reference for the promotion and application of fiber-modified concrete and recycled aggregate pervious concrete.

**Keywords:** concrete; fiber; recycled aggregate; pervious concrete; mechanical property; abrasion resistance