文章编号：1674－2869(2024)01－0091－06

改性稻草纤维对透水再生混凝土性能的影响

许晨雨[1]，秦思谈[1]，陈旭勇[*1,2]
1. 武汉工程大学土木工程与建筑学院，湖北 武汉 430074；
2. 湖北省绿色土木工程材料与结构工程研究中心，湖北 武汉 430074

摘 要：制备了丝状和粉末状两种形态改性稻草纤维，并结合工程实例，设计并开展不同形态和不同掺量的改性稻草纤维对透水再生混凝土性能影响试验。实验结果表明：不同形态改性稻草纤维的掺入均会降低透水再生混凝土抗压强度，但会提升其抗折强度、实际孔隙率和透水系数，其中丝状改性稻草纤维掺量为3.2 kg/m^{3}时透水系数能达到4.53 mm/s，且此时透水再生混凝土抗压强度满足规范要求；而粉末状改性稻草纤维对透水再生混凝土的透水系数提升较小，在掺量为4.8 kg/m^{3}仅能达到3.05 mm/s，说明利用废弃稻草纤维来制备满足透水性能的再生混凝土具有一定的工程意义。

关键词：稻草纤维；透水再生混凝土；抗压强度；抗折强度；透水性能
中图分类号：TU528.37　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202211002

Effect of alkali treatment of rice straw on performance of recycled permeable concrete

XU Chenyu[1], *QIN Sitan*[1], *CHEN Xuyong*[*1,2]
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Engineering Research Center of Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper aims to investigate effects of modified filaceous straw fiber and powdered straw fiber on performance of recycled permeable concrete based on an engineering case. The results show that the incorporation of different forms of modified straw fibers reduces the compressive strength of the recycled permeable concrete, while the flexural strength, actual porosity and water permeability coefficient are enhanced. When the content of filaceous straw fiber is 3.2 kg/m^3, the water permeability coefficient of the recycled permeable concrete reaches 4.53 mm/s, in which compressive strength meets the standard requirements. However, the water permeability coefficient of the recycled permeable concrete incorporated powdered straw fiber has a slight enhancement, and the water permeability coefficient only reaches 3.05 mm/s when the content is 4.8 kg/m^3. This indicates that the utilization of waste straw fiber to prepare recycled concrete with permeable properties has engineering significance.

Keywords: straw fiber; recycled permeable concrete; compressive strength; flexural strength; water permeability

混凝土是目前人类使用最多的建筑材料，并且在未来依然会被广泛应用于各类工程中[1]。在不断发展的同时，人类活动产生了大量废弃混凝土的堆积[2]，如何利用这些废弃混凝土，是目前人类急需解决的问题[3-4]。同时，有些地区夏季雨水充足，仅凭目前已有的地表和地下排水措施，无法

收稿日期：2022-11-01
基金项目：湖北省重点研发计划项目(2020BAB071)
作者简介：许晨雨，硕士研究生。Email：1514307641@qq.com
***通信作者**：陈旭勇，博士，教授。Email：Cxy1314kl@126.com
引文格式：许晨雨，秦思谈，陈旭勇. 改性稻草纤维对透水再生混凝土性能的影响[J]. 武汉工程大学学报，2023，46(1)：91－96，104.

有效解决路面积水问题[5]，因此利用透水混凝土多孔结构可以将地表雨水渗入地下[6]，李争等[7]研究了高性能环氧树脂掺量对透水混凝土力学性能和透水性能的影响，陈守开等[8]将废玻璃颗粒取代再生细骨料制备再生透水混凝土进而研究其物理力学性能，张玉斌等[9]通过引入聚乙烯醇纤维和聚乙烯纤维等制备了一种新型的混杂纤维增强超高性能透水混凝土，陈守开等[10]研究了3种不同的纤维对再生骨料混凝土的性能影响，梁靖等[11]研究了3种不同体积分数的聚乙烯纤维对再生混凝土强度的影响。此外，南方地区农村乡道路边上堆积起来的废弃稻草利用程度非常低，因此“改性稻草纤维透水再生混凝土”（alkali modification on the surface of recycled straw fiber permeable concrete，ASF-RPC）作为一种资源可再生利用的混凝土，目前应得到更多关注。张学元等[12]探索了稻草纤维长度、掺量、形状对轻骨料混凝土力学性能的影响，张睿骁等[13]发现随着稻草纤维粉末掺量增加，混凝土的含水率和吸水率都呈现增加的趋势，王秀丽等[14]研究了稻草纤维掺量对泡沫混凝土的抗压强度和抗折强度等性能的影响，蒋兴敏等[15]研究了不同骨料级配对透水混凝土性能的影响。

对稻草进行提前改性的原因是其表面存在纤维素和木质素等都对水泥有阻凝或缓凝作用，会导致水泥基材料原有的一些性能下降，且未改性稻草纤维易出现干缩和湿膨胀问题。李辉勇[16]发现碱预处理和氨纤维爆破对稻草纤维是最好处理方法，Jiang等[17]发现水泥基中掺入碱预处理的秸秆纤维会带来较好的强度和吸水性。总而言之，现有的研究一般集中于碱预处理稻草纤维对普通混凝土性能影响，而较少关于对透水混凝土影响的研究成果。

本文基于楚藩大道扩建工程道路试验段，设计并开展不同形态、不同掺量的碱改性稻草纤维（alkali modified straw fiber，ASF）对透水再生混凝土强度和透水性能影响研究，进而分析其影响机理，并寻求最佳方案。

1 试验部分

1.1 原材料

天然粗骨料选自鄂州市燕矶镇商混站的9.50~16.0 mm天然碎石，根据《标准普通混凝土用砂、石质量检验方法标准》（JGJ 52—2006）测得表观密度和堆积密度分别为2 719和1 662 kg/m^3，吸水率0.65%，压碎指标11.0%，含泥量0.1%；再生粗骨料选自武汉胜军城建材有限公司再生石回收站路面破坏碎石，粒径在9.50~16.00 mm范围内，测得表观密度和堆积密度分别为2 622和1 670 kg/m^3，吸水率3.36%，压碎指标16.7%，含泥量1.08%；水泥选用武汉本地生产的P.O.42.5普通硅酸盐水泥，物理性能见表1；拌合用水为符合国家自来水标准实验室自来水；减水剂为聚羧酸高性能减水剂，减水率为29%；砂选用细度模数2.7的天然河砂；稻草纤维选用沭阳晴川木园艺有限公司生产的6~10 mm丝状稻草纤维。

表1 水泥物理力学性质指标

Tab. 1 Physical and mechanical properties of cement

比表面积 / (m^2/kg)	初凝时间/终凝时间 / min	氯离子(≤0.06) / %	抗折强度 / MPa		抗压强度 / MPa		标准稠度用水量 / %
			3 d	28 d	3 d	28 d	
341	168/255	0.036	5.0	8.0	26.6	50.8	26.8

1.2 改性稻草纤维制备

丝状碱改性稻草纤维制备方法：温度在20~30 ℃的通常气强下，将一定量的稻草纤维（长度6~10 mm）置于质量分数为4%的NaOH溶液中，浸泡12 h[18]，后将预处理的稻草秸秆放入清水中搅拌并洗涤至中性，放入恒温为60 ℃的电热鼓风干燥箱中风干，图1(a)为丝状碱改性稻草纤维（silk-like alkali modified straw fiber，SASF）。粉末状碱改性稻草纤维制备方法：将已制作好的丝状碱改性稻草纤维通过机械碾碎形成长度小于1 mm的粉末颗粒，图1(b)是粉末状碱改性稻草纤维（powder-like alkali modified straw fiber，PASF）。

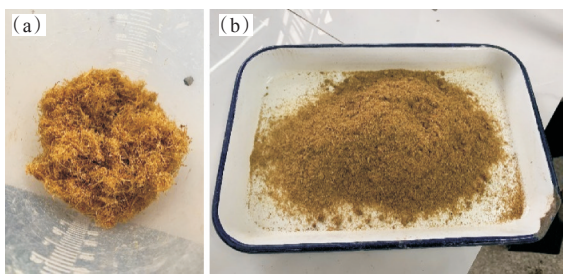


图1 不同形态改性稻草纤维实物图：(a)6~10 mm SASF，(b)PASF

Fig. 1 Real object pictures of different morphologies of modified straw fibers：(a) 6−10 mm SASF，(b) PASF

图2是改性处理前后稻草纤维的电镜

（scanning electron microscope，SEM）图片，可以很明显看到纤维表面由光滑变得表面褶皱粗糙［图2（a）和图2（b）］，从图2（b）中可以看出，细胞壁束分离、一些组织脱落、许多空腔形成以及内部纤维暴露，半纤维素和木质素的分子链受到一定程度的破坏，可以减弱稻草纤维对水化进程不利影响。

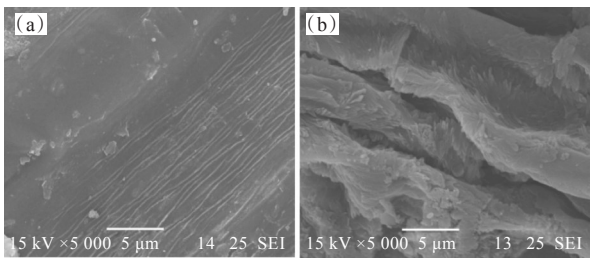


图2　SEM下稻草纤维表面：（a）未改性稻草纤维，（b）碱改性稻草纤维

Fig. 2　SEM images of surface of straw fibers: (a)unmodified straw fibers, (b)alkaline modified straw fibers

1.3　透水再生混凝土配合比设计及制备

根据CJJ/T253—2016《再生骨料透水混凝土应用技术规程》中体积法进行设计，目标孔隙率15%，再生粗骨料的掺量定为30%[19]，丝状和粉末状的纤维分别以0、1.6、3.2、4.8 kg/m³掺量外掺，具体配合比见表2。

制备试样的主要步骤如下：将加入搅拌机的天然粗骨料和再生粗骨料搅拌30 s左右，形成天然-再生混合料，后将改性稻草纤维掺合料均匀撒入混合料中进行干搅拌30~60 s，然后分别将水泥和砂加入其中，在搅拌的过程中搅拌加入称量好的水（含再生骨料附加水），加水的过程中可将聚羧酸高效减水剂加入水中混合投放到搅拌物中，连续正向搅拌60~90 s形成掺入改性稻草纤维的透水再生混凝土拌合物。搅拌完成倒出后呈颗粒状，但可黏结成团。后将拌和物分两层依次进行人工插捣装入模具中，不可进行机械振捣，因为机械振捣容易使砂浆封底，造成透水性能下降。观察到表面颗粒黏结状态后1~2 d后脱模，试块放入20 ℃的标养室中养护至28 d龄期后进行检测。

表2　改性稻草纤维透水再生混凝土配合比

Tab. 2　Mixture ratios of modified recycled straw fiber permeable concrete

试件样	组分配合						
	天然粗骨料 / (kg/m³)	再生粗骨料 / (kg/m³)	水泥 / (kg/m³)	水 / (kg/m³)	砂 / %	减水剂 / %	改性稻草纤维 / (kg/m³)
SASF-RPC-0	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	0
SASF-RPC-1	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	1.6
SASF-RPC-2	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	3.2
SASF-RPC-3	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	4.8
PASF-RPC-0	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	0
PASF-RPC-1	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	1.6
PASF-RPC-2	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	3.2
PASF-RPC-3	1 140	487	502	150.92	6.1	1.1	4.8

1.4　试验方法

1.4.1　*力学性能测试*　抗压强度测试采用的是标准立方体试件，将试件底部对准压力机里承重面中心后摆正，两受压面的尺寸为实际量距，试件放好后即可开始测量；抗折强度测试：将长和宽均为100 mm，高300 mm的小型抗折试块放到试验装置上，两边凸出卡座长度保持一致，上顶面与夹具接触紧密后开启仪器测量。

1.4.2　*透水性能测试*　孔隙率的测试方法是首先将试件在水箱充分浸水24 h后用塑料绳将四周绑好，测出在水箱中间处用手提电子秤拉起状态下的质量m_1（g），称出表面干燥后的质量m_2（g），然后算出试件体积V（cm³），用式（1）计算出透水混凝土的实际孔隙率P（%）。

$$P = \left[1 - \frac{m_2 - m_1}{V}\right] \times 100\% \tag{1}$$

透水系数采用的透水试件是在标准立方体试件上钻取直径100 mm，高50 mm芯样后，通过《透水水泥混凝土路面技术规程》中测量器测试透水系数，如图3所用仪器，透水系数计算如式（2）：

$$K_t = \frac{QL}{AHt} \tag{2}$$

式中：K_t—水温为t ℃时试样的透水系数（mm/s）；Q—时间t秒内渗出的水量（m³）；L—试样的厚度（mm）；A—试样的上表面积（mm²）；H—水位差（mm）；t—时间（s）。

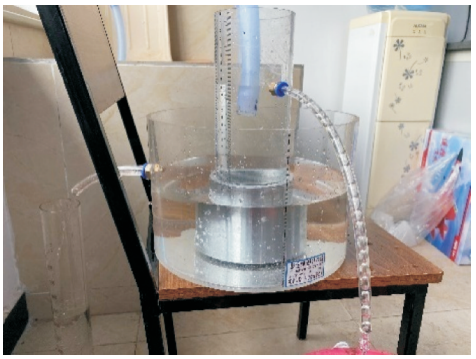


图3 透水系数测试仪器

Fig. 3 Tester for permeability coefficients

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

不同改性ASF对透水再生混凝土28 d抗压强度影响见图4。由图中可以看出,随着ASF掺量的增加,透水再生混凝土28 d抗压强度逐步降低。这是因为稻草纤维在混凝土中所占的体积增加,造成混凝土内部的含气量增加,造成了混凝土强度的下降[20]。而在相同掺量下,丝状改性稻草纤维透水再生混凝土(SASF-RPC)的抗压强度低于粉末状改性稻草纤维透水再生混凝土(PASF-RPC)。其中PASF-RPC抗压强度分别为29.59、27.36、26.51和25.03 MPa,而SASF-RPC抗压强度分别为29.59、25.41、23.32和15.92 MPa,说明丝状改性稻草纤维对透水再生混凝土28 d抗压强度影响较大,且在掺量为4.8 kg/m³,透水再生混凝土强度出现急剧下降。这主要是由于SASF的加入使水泥基内部产生了较多的空隙,导致了混凝土抗压强度降低。

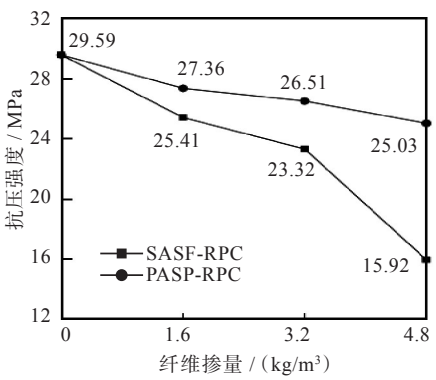


图4 不同形态和掺量ASF对试块抗压强度的影响

Fig. 4 Influences of different forms and dosages of ASF on compressive strength of test block

2.2 抗折强度

不同改性ASF对透水再生混凝土28 d抗折强度影响见图5。从图中可以看到,随着SASF掺量的增加,SASF-RPC抗折强度表现出先增大后降低的趋势,其中掺量为3.2 kg/m³时抗折强度达到最高,而随着PASF掺量的增加,PASF-RPC抗折强度逐步增高,其中SASF-RPC强度分别为3.22、3.73、4.02、2.98 MPa,PASF-RPC强度分别为3.22、3.48、3.62、3.71 MPa。且在3.2 kg/m³掺量以内,SASF-RPC抗折强度总体比PASF-RPC的高,原因在于SASF更能体现稻草纤维的加筋效应,能够延缓微裂缝的产生和发展,故而增加了混凝土试块的抗折强度。但SASF掺量为4.8 kg/m³时抗折强度显著下降,因为此时混凝土内部没有形成较好的稳定结构导致的。而PASF-RPC的抗折强度能缓慢提升原因在于PASF在水泥浆体内部的桥接效应发挥了作用[21],但是没有SASF的加筋效果明显。

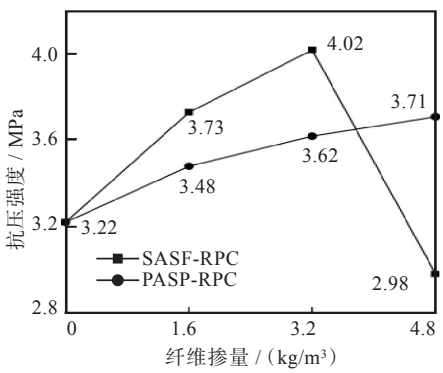


图5 不同形态和掺量ASF对试块抗折强度的影响

Fig. 5 Influences of different forms and dosages of ASF on flexural strength of test block

2.3 折压比

不同改性ASF对透水再生混凝土28 d折压比影响见图6。由图可见,随着改性稻草纤维掺量增加,ASF-RPC的折压比都是呈上升趋势,且SASF-RPC折压比分别为10.88%、14.67%、17.24%、18.72%,PASF-RPC折压比分别为10.88%、12.72%、13.66%、

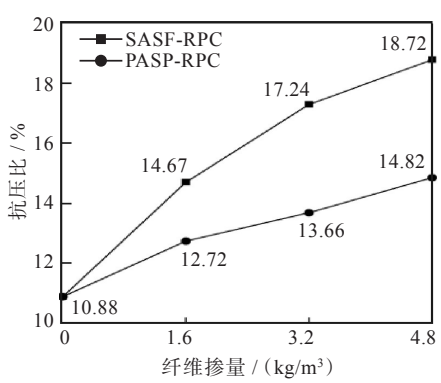


图6 不同形态和掺量ASF对试块折压比的影响

Fig. 6 Influences of different forms and dosages of ASF on pressure ratios of test block

14.82%。这意味着能改善再生骨料透水混凝土脆性破坏的状态，使得它向塑性破坏的方向转变，提高ASF-RPC的韧性[22]，且SASF-RPC总体折压比高于PASF-RPC，产生透水再生混凝土韧性效果更佳的效果。

2.4　透水性能

不同改性ASF对透水再生混凝土28 d透水性能影响见图7。由图7可明显看出，SASF-RPC的透水系数和实际孔隙率随着ASF掺量增加两者同时得到提升，与强度呈反向趋势，但PASF-RPC的透水系数和实际孔隙率变化较平缓，其中PASF-RPC的透水系数分别为1.87、2.12、2.63、3.05 mm/s，且对应的实际孔隙率分别为13.53%、14.81%、15.65%、16.73%；SASF带来的透水效果优于PASF，随着掺量的增加，透水性能提升较快，且透水系数分别为1.87、3.16、4.53、8.22 mm/s，实际孔隙率分别为13.53%、16.3%、19.3%、25.6%。从上述现象也反映出力学性能与透水性能存在相互矛盾的关系[23-24]。

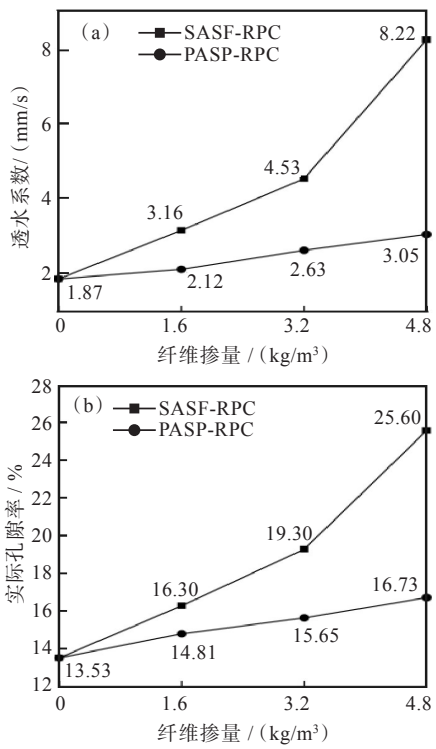


图7　不同形态和掺量ASF对试块透水性能的影响：(a)透水系数，(b)实际孔隙率

Fig. 7　Effects of different forms and dosages of ASF on water permeability of test block: (a) water permeability coefficient, (b) actual porosity

不同形态改性稻草纤维透水再生混凝土内部微观分析见图8。由于ASF与水泥基材料是存在相容性差的问题，容易在水泥界面过渡区附近形成较多孔隙，但是可以利用多孔隙来提升透水率。如图8(a)所示，可以看到SASF镶嵌在水合物中，有SASF的穿插的地方都会形成孔洞来提升透水性能，而如图8(b)中PASF只能以微粒的形式来形成较小孔隙，能增加透水能力但是不及SASF带来的孔隙效果。

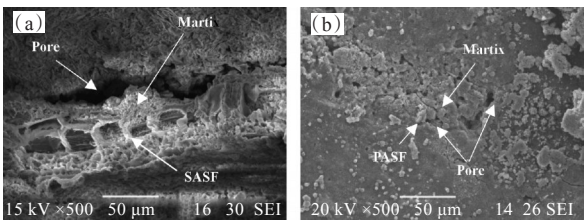


图8　SASF-RPC和PASF-RPC的SEM图：(a)SASF-RPC，(b)PASF-RPC

Fig. 8　SEM images of SASF-RPC and PASF-RPC: (a) SASF-RPC, (b) PASF-RPC

2.5　强度和透水性之间的关系

通过试验对强度和透水能力的研究已分析出这两者存在相互矛盾关系，就这一现象对不同形态改性稻草纤维透水再生混凝土的抗压强度和透水系数进行数据拟合。

通过拟合，得到SASF-RPC方程式(3)，R^2为0.995 07；

$$t = \frac{28.874\,3}{e^{\frac{k}{25.035\,81}}} - 7.050\,98 \tag{3}$$

PASF-RPC的拟合方程式(4)，R^2为0.954 36。

$$t = \frac{1\,752.129\,37}{e^{\frac{k}{3.613\,8}}} + 1.354\,56 \tag{4}$$

其中t为透水系数，单位是mm/s；k为抗压强度，单位是MPa。

不同形态改性稻草纤维透水再生混凝土28 d抗压强度与透水系数的拟合关系见图9。随着两种改性稻草透水再生混凝土透水系数的提高，抗压强度降低，原因在于纤维掺量的增加，能提升透水再生混凝土内部孔隙数量，从而提高透水能力；相反，混凝土内部结构因孔隙的增多而变得松散，造成强度降低。所以寻找一个使得透水再生混凝土强度与透水能力相平衡的参数至关重要，由于透水能力在透水混凝土实践工程中作为首先考虑的指标，在强度满足透水混凝土规范要求前提下，透水再生混凝土在丝状改性稻草纤维3.2 kg/m³掺量下的性能更符合实际要求。

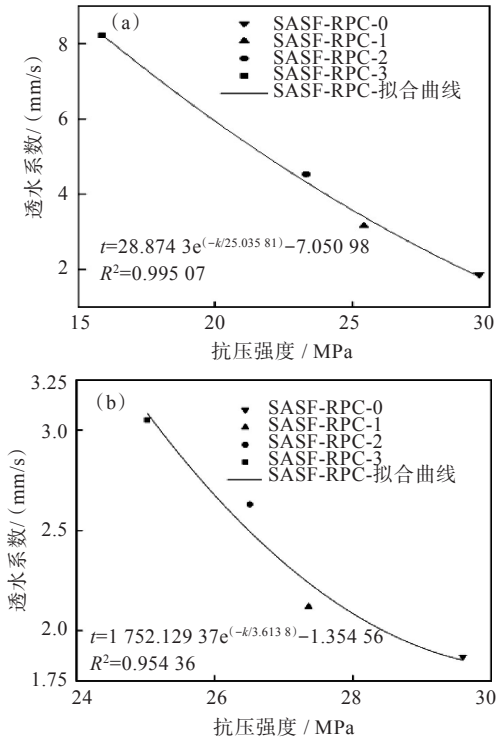


图9 不同形态改性稻草纤维透水再生混凝土抗压强度与透水系数的拟合关系:(a)SASF-RPC,(b)PASF-RPC

Fig. 9 Fitting relationship between different forms of alkali modification on surface of recycled straw fiberpermeable concrete compressive strength and water permeability coefficients:(a)SASF-RPC,(b)PASF-RPC

3 结 语

(1)SASF-RPC随SASF掺量增加抗压强度逐渐下降,而抗折强度逐渐提高,但掺量达到4.8 kg/m³时透水再生混凝土抗压、抗折强度低于规范要求。PASF对透水再生混凝土抗压强度影响较小,提升了抗折强度,且在掺量最大时达到最大,SASF-RPC最高折压比比PASF-RPC最高折压比高出20.83%,这表明ASF能改善再生骨料透水混凝土脆性破坏的状态,使得它向塑性破坏的方向转变,并且相比之下SASF-RPC表现出更好的韧性。

(2)ASF-RPC的透水性能随着不同形态ASF掺量的增加总体呈上升趋势,这表明纤维掺量的增加能提升透水再生混凝土内部孔隙数量,从而提高透水能力,且SASF-RPC在掺量3.2 kg/m³时实际孔隙率为19.3%,透水系数为4.53 mm/s,优于PASF-RPC在最大掺量时的实际孔隙率,对应的透水系数最高仅有3.05 mm/s。

(3)结合力学性能与透水性能两者数据和关系可以得出,SASF掺量为3.2 kg/m³时SASF-RPC性能最佳,更加符合实践工程规范要求,虽然PASF掺量为4.8 kg/m³时PASF-RPC效果最好,但抗压强度仅比SASF-RPC高出6.83%,透水系数却大幅降低。从以上研究结果可以说明利用废弃稻草纤维实现透水再生混凝土的固废利用,来制备满足透水性能再生混凝土是可行的。

参考文献

[1] MEHTA P K,MONTEIRO P. Concrete:microstructure, properties, and materials [M]. New York: Prentice-Hall,2013.

[2] TAWANA M M,肖建庄.废混凝土的回收[C]//中国土木工程学会.首届全国再生混凝土研究与应用学术交流会论文集.北京:中国知网,2008:85-89.

[3] 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.

[4] 程子扬,李敬芳,陈旭勇,等.骨料含水量的差异对于粉煤灰再生混凝土性能的影响[J].武汉工程大学学报,2021,43(5):534-538,556.

[5] 徐行军,秦红星,卓维松.透水混凝土路面对雨水径流的影响研究[J].公路工程,2019,44(6):135-139.

[6] 明瑞平,谢艾利,张亚杰,等.透水混凝土强度及渗透性能研究[J].混凝土,2022(4):147-149,153.

[7] 李争,李宏亮,孙晋明.高性能环氧树脂透水混凝土的制备及其性能研究[J].功能材料,2022,53(9):9231-9236.

[8] 陈守开,刘洋,赵云鹏,等.废玻璃颗粒对再生骨料透水混凝土的改性作用[J].建筑材料学报,2023,26(1):37-44.

[9] 张玉斌,鲍世辉,张聪.混杂纤维增强超高性能透水混凝土的弯曲性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(6):1955-1962.

[10] 陈守开,卢鹏,李炳林,等.不同纤维对再生骨料透水混凝土性能的影响与评价[J].应用基础与工程科学学报,2022,30(1):208-218.

[11] 梁靖,刘胜兵,郑宇航.聚乙烯纤维对再生混凝土性能的影响[J].武汉工程大学学报,2022,44(3):346-349.

[12] 张学元,王丹丹,张道明,等.稻草纤维轻骨料混凝土力学性能影响因素研究[J].硅酸盐通报,2019,38(5):1369-1376.

[13] 张睿骁,苏有文.稻草纤维粉末混凝土及砌块的性能研究[J].新型建筑材料,2018,45(8):68-71.

[14] 王秀丽,潘旭宾,吴征.稻草纤维增强泡沫混凝土物理力学性能试验研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文):1-10[2022-10-31].http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.tu.20220606.2112.004.html.

[15] 蒋兴教,肖莲珍.不同骨料级配透水混凝土的性能研究及其孔隙识别[J].武汉工程大学学报,2020,42(1):54-59,65.

(下转第104页)