

短切聚丙烯纤维对透水混凝土的性能影响

田玉海*, 张粉芹, 卢博文, 徐 潇, 许珈伟, 高东超

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年4月3日; 录用日期: 2024年4月23日; 发布日期: 2024年4月30日

摘 要

以短切聚丙烯纤维作为增强材料, 设计不同尺寸和掺量的短切聚丙烯纤维透水混凝土(CPPFPC), 通过试验分析了不同尺寸、不同掺量短切聚丙烯纤维对透水混凝土抗压强度、抗折强度、透水性能及抗冲击性能的影响, 结果表明: 各尺寸短切聚丙烯纤维掺量为0.2%时, 透水混凝土的综合性能较好; 短切聚丙烯纤维对透水混凝土的抗压强度、抗折强度及抗冲击性能均有提升, 抗折强度提升效果相对于抗压强度较弱, 而抗冲击性能提升较为显著。

关键词

短切聚丙烯纤维, 透水混凝土, 强度, 抗冲击性, 破坏形式

Effect of Chopped Polypropylene Fiber on the Performance of Pervious Concrete

Yuhai Tian*, Fenqin Zhang, Bowen Lu, Xiao Xu, Jiawei Xu, Dongchao Gao

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Apr. 3rd, 2024; accepted: Apr. 23rd, 2024; published: Apr. 30th, 2024

Abstract

Using the chopped polypropylene fiber as the reinforcing material, different sizes and dosages of chopped polypropylene fiber permeable concrete (CPPFPC) were designed. The influence of different sizes and dosage on the compressive strength, folding strength, water permeability and impact resistance of permeable concrete were analyzed through experiments. The results show that when the amount of chopped polypropylene fiber of each size is 0.2%, the comprehensive performance of permeable concrete is good; chopped polypropylene fiber improves the compressive strength, folding resistance and impact resistance of permeable concrete. The improvement

*通讯作者。

文章引用: 田玉海, 张粉芹, 卢博文, 徐潇, 许珈伟, 高东超. 短切聚丙烯纤维对透水混凝土的性能影响[J]. 土木工程, 2024, 13(4): 556-565. DOI: 10.12677/hjce.2024.134060

effect of the antifolding strength is weak compared to the compressive strength, and the impact resistance performance is more significantly improved.

Keywords

Chopped Polypropylene Fiber, Pervious Concrete, Strength, Impact Resistance, Destructional Forms

Copyright © 2024 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

透水混凝土作为海绵城市中重要的建筑材料，能够提高海绵城市透水路面的渗透能力，起到良好的生态水循环作用，提高城市的舒适性[1]。但透水混凝土内部结构不紧密、强度不高以及脆性大的缺点限制了其在海绵城市中的推广和使用[2]。

研究表明，透水混凝土的力学性能和透水性能难以兼得，提高力学性能很大程度上会牺牲其透水性能[3]，若增加胶凝材料用量来提高透水混凝土强度，则会造成透水系数降低。而通过增大目标孔隙率来增加混凝土的透水性，则会使其强度降低[4] [5] [6]。因此，如何在提升透水混凝土的力学性能的同时兼顾透水性能成为大部分学者研究的重点。纤维作为常用的混凝土改性材料，对提升混凝土力学性能具有积极作用[7]。在透水混凝土中掺入适量纤维，也能起到类似于普通混凝土力学性能的增强效果，并且透水性能无明显降低[8]。

聚丙烯纤维具有强度高、韧性好和价格低廉的优点[9]，目前国内外学者研究了短切聚丙烯纤维对不同水灰比和目标孔隙率下透水混凝土性能的影响[10] [11] [12]，但对短切聚丙烯纤维不同尺寸和掺量对透水混凝土性能影响的研究较少。为了解决目前存在的问题，本研究在 15%目标孔隙率下，选用尺寸为 6 mm、12 mm、18 mm 的短切聚丙烯纤维，将其以体积百分比 0.1%、0.2%、0.3%掺入透水混凝土。研究不同尺寸、不同掺量短切聚丙烯纤维对透水混凝土抗压、抗折强度、透水系数和抗冲击强度的影响。

2. 原材料及试验方案

2.1. 原材料

本试验研究选用的水泥为甘肃省祁连山水泥有限公司生产的 P-O 42.5，其性能指标见表 1；骨料采用单一粒径碎石，粒级 4.5~9.5 mm，其性能指标见表 2；纤维选自长沙柠祥建材有限公司生产的 6 mm、12 mm、18 mm 短切聚丙烯纤维(见图 1)，其性能指标见表 3；拌合用水为实验室普通自来水。

Table 1. Basic physical and mechanical properties of cement

表 1. 水泥的基本物理力学性能

密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	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	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
3.1	335	165	210	5.8	6.9	30.1	48.5

Table 2. Grastone performance indicators
表 2. 碎石性能指标

骨料粒径 /mm	表观密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	紧密堆积密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	含泥量/%	针片状含量 /%	压碎指标 /%	紧密堆积孔隙率 /%
4.5~9.5	2745	1440	0.8	0.7	5	47



Figure 1. Chopped polypropylene fiber (6 mm, 12 mm, 18 mm)
图 1. 短切聚丙烯纤维(依次为 6 mm、12 mm、18 mm)

Table 3. Performance index of chopped polypropylene fiber
表 3. 短切聚丙烯纤维性能指标

纤维类型	密度 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	单丝直径/ μm	长度/mm	拉伸强度 /MPa	弹性模量/MPa	断裂延伸率/%
短切聚丙烯纤维	910	15.0~48.0	6/12/18	>458	>4000	29.8

2.2. 试验方案

本研究采用体积法进行透水混凝土的配合比设计，其设计原理为水泥浆体填充一部分碎石间孔隙，而未被填充的部分为目标孔隙率，浆体体积为水泥体积、纤维体积和水体积之和。根据前期对透水混凝土基准配合比进行的试拌试验，在水灰比为 0.35 时透水混凝土拌合物状态最佳[13]。因此，本试验以水灰比 0.35，设计孔隙率 15% 的无纤维透水混凝土为基准对照组，设计掺入尺寸为 6 mm、12 mm、18 mm，掺量为 0.1%、0.2%、0.3% 的短切聚丙烯纤维透水混凝土(CPPFPC)，最终配合比见表 4。

Table 4. Mix ratio of CPPFPC
表 4. CPPFPC 配合比

试验编号	聚丙烯纤维尺寸 /mm	聚丙烯纤维/%	水泥 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	碎石/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	纤维掺量 / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
A-0-0	0	0	483	169	1411	0
A-6-0.1	6	0.1	482	169	1411	0.91
A-6-0.2	6	0.2	481	169	1411	1.82
A-6-0.3	6	0.3	480	169	1411	2.73
A-12-0.1	12	0.1	482	169	1411	0.91
A-12-0.2	12	0.2	481	169	1411	1.82
A-12-0.3	12	0.3	480	169	1411	2.73

续表

A-18-0.1	18	0.1	482	169	1411	0.91
A-18-0.2	18	0.2	481	169	1411	1.82
A-18-0.3	18	0.3	480	169	1411	2.73

本试验制作了尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm、40 mm × 40 mm × 160 mm 和 $\phi 100 \times 50$ mm 的三种混凝土试件，分别测试抗压强度、抗折强度和透水系数。试验采用的制备工艺流程如图 2 所示，试件分上下两层装模成型，人工插捣后按压平整顶面，24 h 后拆模放标准养护室养护[14] [15]。

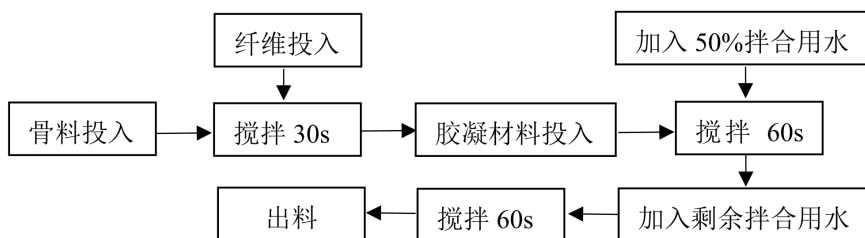


Figure 2. Preparation process flow diagram of CPPFPC
图 2. CPPFPC 制备工艺流程图

2.3. 测试方法

2.3.1. 抗压抗折强度测试

本研究中对透水混凝土抗压抗折强度的测定采用普通混凝土的测试方法，具体按照国家标准 GB/T50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》执行。

2.3.2. 透水性能测试

透水混凝土的透水性能用透水系数来表示。测定方法如下：将标准养护下达到龄期后的试块取出擦干表面水分，用胶泥对其四周进行密封(见图 3(a))，将密封好的试块放入透水仪器中检查其密封效果，检查达标后，将整套透水装置放入水槽中，从仪器上方缓缓加水，保持透水混凝土试块上方一定的水位，

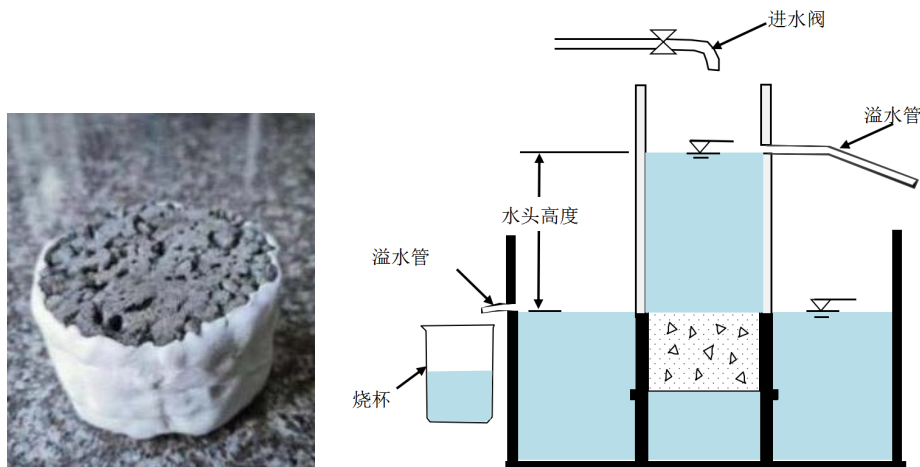


Figure 3. Schematic diagram of seal test block and pervious device
图 3. 密封试块及透水装置示意图

待溢水槽有水稳定流出后开始测试。用量筒在溢流口处接水，记录 1 min 的流出的水量(Q)，读取透水仪器上的水位差(H)，用温度计测量试验过程中水的温度(T) (见图 3(b))，试验结果取三块试样的平均值，按下式计算得出透水系数。

$$k_T = \frac{QL}{AHt} \quad (1)$$

其中： k_T 为水温 $T^\circ\text{C}$ 时试样的透水系数， $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ； Q 为时间 t 秒内溢出的水量， cm^3 ； L 为试样的高度， cm ； A 为粗试样的上表面积， cm^2 ； H 为水位差， cm ； t 为时间， s 。

2.3.3. 抗冲击性能测试

抗冲击性能试验参照美国 ACI544 委员会提出的落重法自制试验设备[16]，试验装置如图 4 所示。受冲击试件为圆柱体直径 $D = 100 \text{ mm}$ ，高度 $h = 50 \text{ mm}$ ，冲击锤自重 $m = 3.0 \text{ kg}$ ，冲击锤下落高度 $h = 450 \text{ mm}$ ，每组制作六个试件。

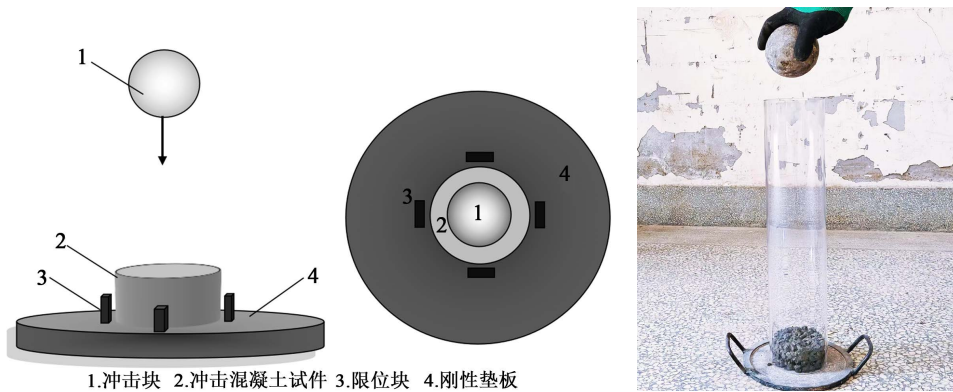


Figure 4. Drop hammer impact schematic diagram and test device
图 4. 落锤冲击示意图及试验装置

该试验方法通过以下几个指标来评判或比较试件的抗冲击能力：① 开始试验至试件第一次出现裂缝(初裂)时的冲击次数 N_1 ；② 初裂后，裂缝不断发展至试件表面不能稳定承载冲击锤时的次数 N_2 ， N_2 被定义为试件破坏次数；③ 试件初裂和破坏时冲击次数的差值(N_2-N_1)；④ 冲击韧性，即试件抵抗冲击破坏过程中所吸收的所有能量，用冲击功 W 表示。冲击功的计算方式见下式：

$$W = Nmgh \quad (2)$$

其中： W 为冲击功， J ； N 为试件终裂次数； m 为冲击锤质量， kg ； g 为重力加速度(取 9.8)， $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ； h 为冲击锤下落距离， m 。

2.3.4. SEM 微观表征

本文采用蔡司 GeminiSEM 360 系列扫描电子显微镜观察含不同聚丙烯纤维长度、掺量的各组试件受破坏后的微观形貌，从微观结构分析短切聚丙烯纤长度和掺量对透水混凝土的影响。

3. 结果与分析

3.1. 抗压强度

图 5 为 CPPFPC 7 d、28 d 抗压强度变化关系。从试验数据分析得出，CPPFPC 的 7 d、28 d 抗压强度较无纤维透水混凝土基准组提升幅度分别为 9.3%~39.6% 和 22.7%~47.2%。随着纤维掺量的逐渐增加，各

尺寸 CPPFPC 的 7 d、28 d 抗压强度呈现先增大后降低的趋势，在 0.2% 掺量时取得最大值。

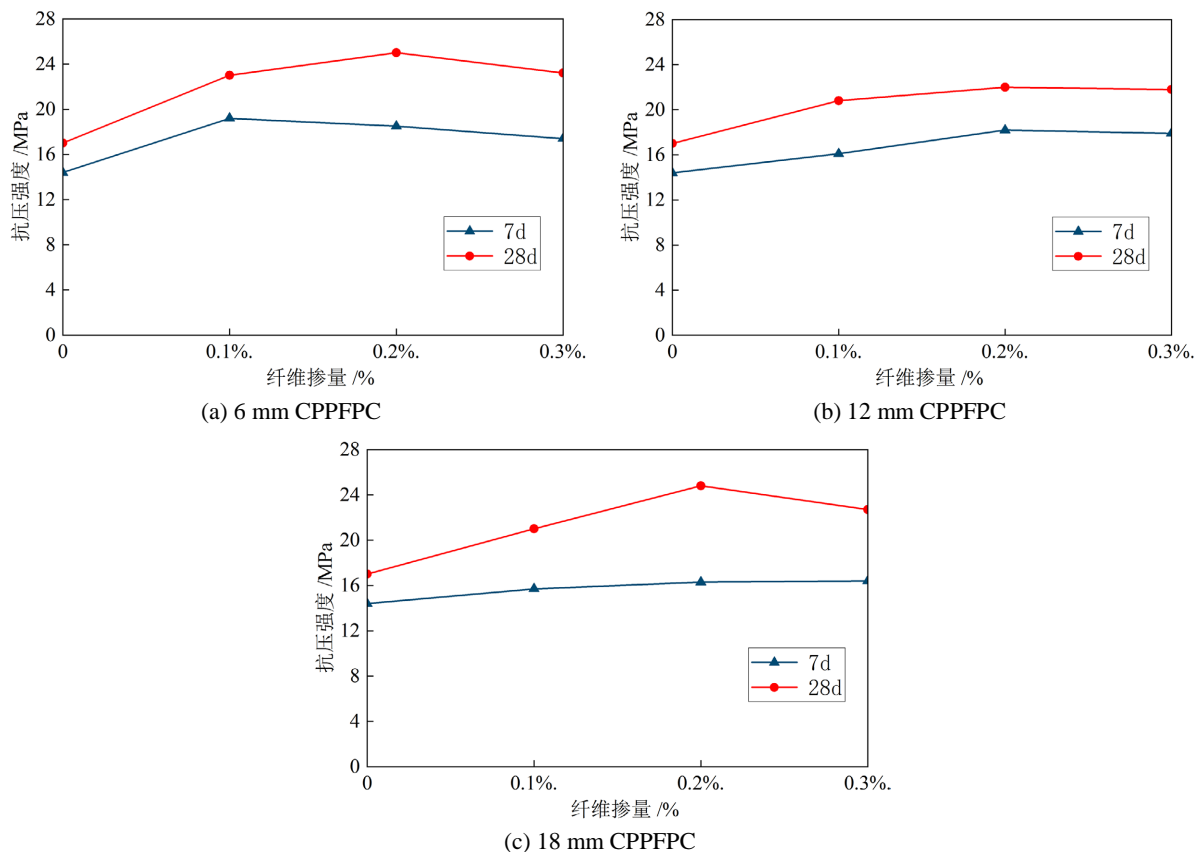
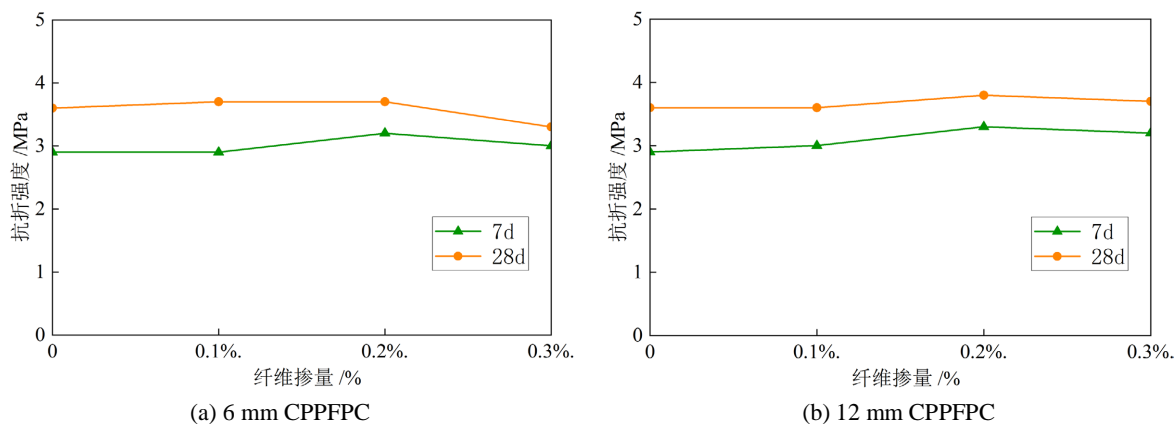
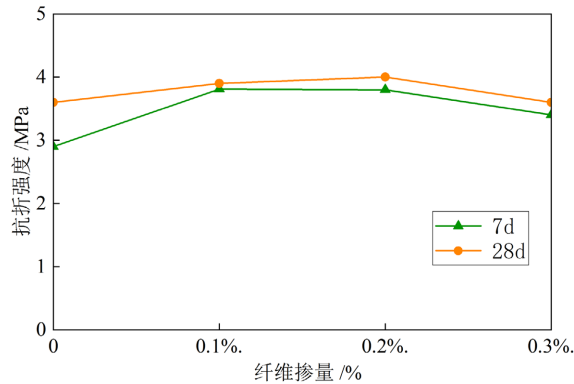


Figure 5. Curves of the compressive strength changes of CPPFPC
图 5. CPPFPC 抗压强度变化曲线

3.2. 抗折强度

图 6 为 CPPFPC 7 d、28 d 抗折强度变化关系。从试验数据分析得出，CPPFPC 的 7 d、28 d 抗折强度较无纤维透水混凝土基准组提升幅度分别为 13.1%~24.7% 和 7.5%~12.2%，整体提升效果相对于抗压强度较弱。随着纤维掺量的逐渐增加，6 mm、12 mm、18 mm CPPFPC 的 7 d、28 d 抗折强度呈现先增大后趋于稳定的变化趋势。





(c) 18 mm CPPFPC

Figure 6. Curve of changes in resistance strength of CPPFPC

图 6. CPPFPC 抗折强度变化的曲线

3.3. 透水性能

由图 7 可见，随着短切聚丙烯纤维尺寸的增大和各尺寸纤维掺量的增加，透水混凝土的 28 d 透水系数呈现先增大后减小的变化趋势。短切聚丙烯纤维 6 mm、12 mm、18 mm 三种尺寸均在 0.2% 掺量时达到最优值，且在 0.1%、0.2%、0.3% 三种掺量下，12 mm 短切聚丙烯纤维透水性能最佳。

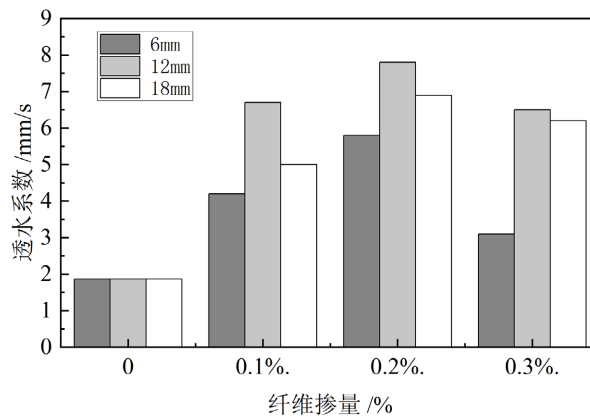


Figure 7. Changes of fiber size, incorporation and water permeability coefficient

图 7. 纤维尺寸、掺量与透水系数的变化关系

3.4. 抗冲击性能

图 8(a)为冲击功变化关系。随着 6 mm、12 mm、18 mm 短切聚丙烯纤维掺量的增加，透水混凝土的冲击功均呈现先增大后减小的变化趋势，在掺量为 0.2% 时三种尺寸 CPPFPC 冲击功最大。在纤维掺量 0.1% 时，纤维在水泥浆体中的掺量较低，不能对水泥石起到形成有效的强度提升作用；在掺量 0.2% 时，纤维能适当地降低水泥浆体的流动性，更有利于包裹骨料，提升水泥-骨料界面强度，从而提高透水混凝土的抗冲击性能；在掺量 0.3% 时，纤维降低水泥浆体的流动性，造成强度分布不均，出现大部分薄弱界面，导致冲击功下降。

图 8(b)为抗冲击次数变化关系，CPPFPC 抗冲击次数较无纤维透水混凝土抗冲击次数有明显的提高，提高幅度为 1.5~3.0 倍。18 mm 短切聚丙烯纤维掺量为 0.2% 时，抗冲击次数提高最大。无纤维透水混凝土在初裂后紧接着就会发生破坏，而 CPPFPC 初裂后，一般再承受 2~5 次冲击才会发生破坏，可能是由

于较长的 18 mm PPF 不仅分散性良好, 更能较好地约束周边骨料, 阻止其发生错位, 导致透水混凝土突然断裂, 增加其工作周期。

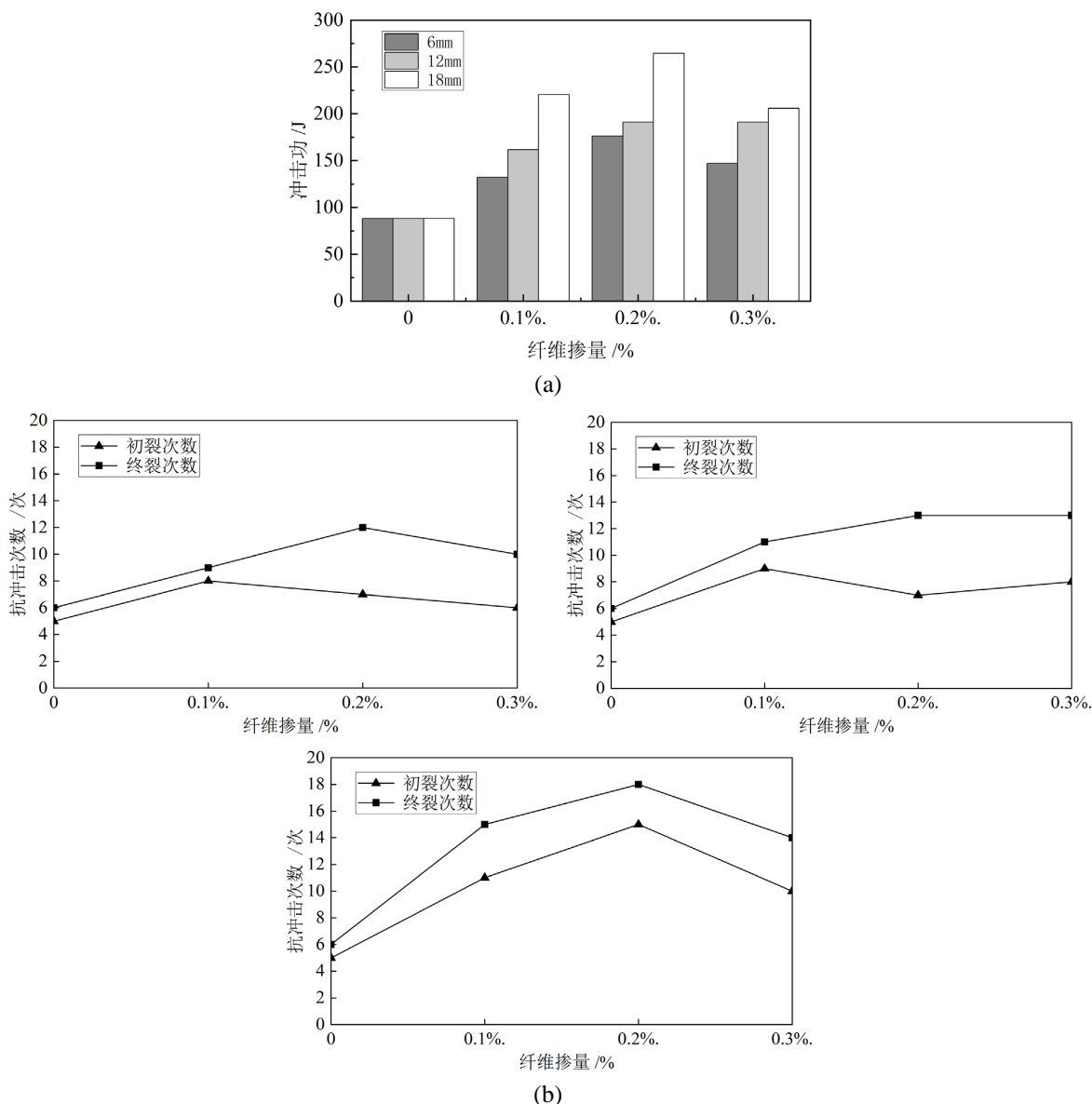


Figure 8. Effect of chopped polypropylene fiber of different sizes and dosage on impact resistance of 28 d pervious concrete. (a) The change relationship of the impact work; (b) Change relationship of impact times

图 8. 不同尺寸、掺量短切聚丙烯纤维对透水混凝土 28 d 抗冲击性能的影响。(a) 冲击功变化关系; (b) 冲击次数变化关系

3.5. 多项式拟合分析

将透水混凝土掺短切聚丙烯纤维三种尺寸在不同掺量情况下与 28 d 抗压强度、抗折强度和透水系数分别进行多项式拟合, 结果见图 9 (图中粗实线为拟合曲线)。从图 7 可见, 短切聚丙烯纤维 6 mm、12 mm、18 mm 在 0.1%、0.2%、0.3% 掺量下与其 28 d 抗压抗折强度、透水系数均有较好的相关性, 并呈现一定指数函数关系。

对于 6 mm 短切纤维，随着纤维掺量的增加，单位体积水泥石内纤维数量随之增加，“纤维阻裂机理”更加明显，从而提高了透水混凝土的强度，与已有研究成果一致[17] [18]；但 12 mm、18 mm 短切纤维掺量大时透水混凝土强度下降或趋于稳定，主要是按体积法掺入，长纤维单位体积内分布的纤维数量较少，阻裂作用有所减弱。

根据“填充理论”，透水混凝土的透水系数取决于骨料被水泥浆填满之后的孔隙率[19]。在纤维掺量 0.1% 时，纤维对水泥浆体的流动性影响不大，对水泥浆体流向骨料间的空隙影响小，因此其透水系数较无纤维透水混凝土提升不高；在掺量 0.2% 时，纤维能适当地降低水泥浆体的流动性，更有利于包裹骨料，流向骨料间的空隙的水泥浆少，使得孔隙率增大，从而提高透水混凝土的透水系数；在掺量 0.3% 时，长纤维会堵塞一部分骨料空隙，导致透水系数反而降低。

通过拟合曲线进行分析，三种尺寸的短切聚丙烯纤维掺量在 0.2% 左右时，透水混凝土综合性能较好。

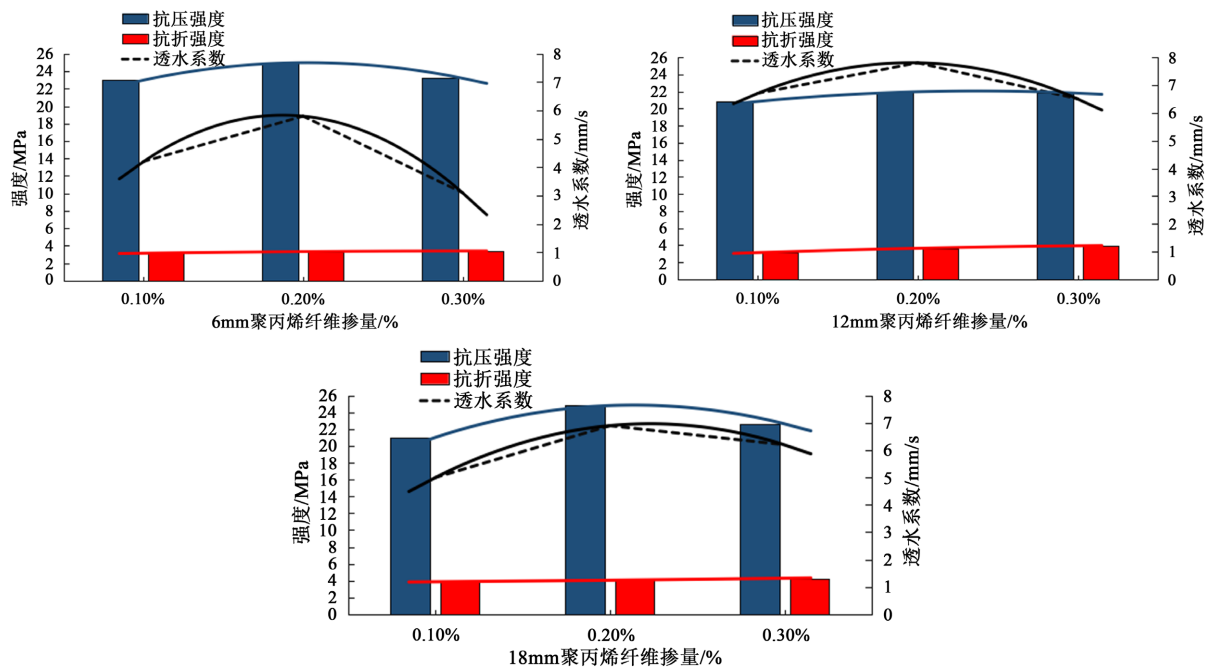


Figure 9. Fitting relationship between incorporation and permeability coefficient and compressive folding strength at different sizes

图 9. 不同尺寸下掺量与透水系数、抗压抗折强度的拟合关系

4. 结论

通过对不同尺寸和掺量的短切聚丙烯纤维透水混凝土的宏观及微观试验研究，得出下列结论：

(1) 短切聚丙烯纤维的掺入对透水混凝土的抗压强度、抗折强度都有一定的提升，7 d、28 d 抗压强度较基准组分别提升 9.3%~39.6%和 22.7%~47.2%；7 d、28 d 抗折强度较基准组分别提升 13.1%~24.7%和 7.5%~12.2%，但整体提升效果相对于抗压强度较弱。

(2) 随着短切聚丙烯纤维尺寸、掺量的增加，透水混凝土的透水系数均呈现先增大后减小的变化趋势，短切聚丙烯纤维 6 mm、12 mm、18 mm 三种尺寸均在 0.2% 掺量时达到最大透水系数，分别为 $5.8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $7.8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $6.9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

(3) CPPFPC 较无纤维透水混凝土抗冲击次数提高了 1.5~3.0 倍。无纤维透水混凝土在出现第一次裂缝后紧接着就会发生破坏，无纤维透水混凝土在初裂后紧接着就会发生破坏，而 CPPFPC 初裂后，一般

再承受 2~5 次冲击才会发生破坏。较大尺寸的 18 mm 聚丙烯纤维更能发挥其物理力学特性, 提高透水混凝土的抗冲击性能。

(4) 通过多项式拟合分析, 短切聚丙烯纤维掺量跟 28 d 抗压强度、抗折强度、透水系数之间皆有一定指数函数关系, 其拟合结果具有良好的相关性。在短切聚丙烯纤维尺寸为 18 mm、掺量为 0.2% 时, 透水混凝土的综合性能较好。

参考文献

- [1] Ibrahim, A., Mahmoud, E., Yamin, M., *et al.* (2014) Experimental Study on Portland Cement Pervious Concrete Mechanical and Hydrological Properties. *Construction & Building Materials*, **50**, 524-529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.022>
- [2] 龚平, 谢先当, 李俊涛. 成型工艺对再生骨料透水混凝土性能的影响研究[J]. 施工技术, 2015, 44(12): 65-68.
- [3] 黄显全, 刘卫东, 熊剑平. 透水混凝土搅拌与成型方式研究进展[J]. 公路, 2021, 66(4): 11-17.
- [4] 张勇, 贾文文, 徐长科, 等. 不同因素对透水混凝土性能影响的研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(11): 25-28.
- [5] 姜蹇, 周华新, 崔巩, 谢德擎. 骨料和配合比参数对透水混凝土基本性能影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(8): 1-5.
- [6] Muthukumar, S., Saravanan, A.J., Raman, A., *et al.* (2020) Investigation on the Mechanical Properties of Eco-Friendly Pervious Concrete. *Materials Today: Proceedings*, **46**, 4909-4914. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.333>
- [7] Akand, L., Yang, M. and Wang, X. (2018) Effectiveness of Chemical Treatment on Polypropylene Fibers as Reinforcement in Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, **163**, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.068>
- [8] 崔征, 王达道, 徐志峰. 外掺材料对透水混凝土性能影响的研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(11): 83-86+91.
- [9] 严武建, 牛富俊, 吴志坚, 等. 冻融循环作用下聚丙烯纤维混凝土的力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(4): 37-44.
- [10] 满都拉, 曹美琪. PE 纤维透水混凝土的强度与韧性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(10): 3417-3421.
- [11] 许耀, 吴庆, 史文浩, 等. 不同短切纤维对高强透水混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(10): 40-43.
- [12] Zhou, Y.W., Fan, Z.H., *et al.* (2015) Bond Behavior of FRP-to-Concrete Interface under Sulfate Attack: An Experimental Study and Modeling of Bond Degradation. *Construction and Building Materials*, **85**, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.031>
- [13] 申明昊, 张粉芹, 许浩然, 陈越, 孟芳, 高扬. 基于体积法的不同目标孔隙率下透水混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2021(9): 140-144+148.
- [14] 王玥, 闫滨, 李成林. 透水混凝土制备及性能研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2017(3): 864-869.
- [15] 徐仁崇, 桂苗苗, 龚明子, 等. 不同成型方法对透水混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2011(11): 129-131.
- [16] American Concrete Institute (2010) ACI 522R-10 Pervious Concrete.
- [17] Romualdi, J.P. and Batson, G.B. (1963) Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **89**, 147-168. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000381>
- [18] Romualdi, J.P. and Mandel, J.A. (1964) Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Length of Wire Reinforcement. *Journal of American Concrete Institute*, **61**, 657-672. <https://doi.org/10.14359/7801>
- [19] Ng, P., Kwan, K.A. and, Li, G.L. (2016) Mix Rate Design of High Performance Concrete Based on Filling Theory and Film Thickness Theory. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics Engineering)*, **17**, 759-781. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1600439>