

聚丙烯纤维透水水泥混凝土受力性能研究

单景松¹, 刘建¹, 王敏², 李峰³(1. 山东省土木工程防灾减灾重点实验室(山东科技大学), 山东 济南 250031; 2. 日照市城市建设投资集团有限公司;
3. 山东汇通建设集团有限公司)

摘要: 选用 6、12 和 18 mm 3 种纤维长度, 每种长度的掺量分别取 1.0、1.5 和 2.0 kg/m³, 进行了抗压、抗折和抗冻融性能试验。结果表明: 纤维长度 18 mm、掺量为 1.5 kg/m³ 时透水水泥混凝土 7、28 d 的抗压强度达到最大峰值, 较不加纤维试件增加了 41.7% 和 52.3%; 纤维长度 12 mm、掺量为 1.0 kg/m³ 时透水水泥混凝土抗折强度达到最大峰值, 由不加纤维时的 4.4 MPa 增加至 5.3 MPa; 掺加 18 mm 长纤维对增强透水混凝土的抗冻融能力最明显, 经 225 次饱水冻融循环后, 残余抗压强度比与不加纤维试件相比由 31.1% 增加到 78%。说明聚丙烯纤维对提升透水水泥混凝土的抗压、抗折强度及长期耐冻融能力都有明显的作用。纤维的掺量及长度变化对透水混凝土各性能的影响不同, 可根据实际受力状态和功能要求综合确定纤维参数, 建议纤维长度范围取 12~18 mm、掺量取 1.0~1.5 kg/m³。

关键词: 聚丙烯纤维; 透水水泥混凝土; 抗压强度; 抗折强度; 残余强度比

为改善混凝土的物理力学性能, 纤维类材料被广泛添加于混凝土中, 如钢纤维、矿物纤维、有机纤维等。张艳聪(2018 年)将废轮胎中的钢纤维掺入混凝土中, 混凝土强度得到明显增强; 张丽(2016 年)在水泥基透水混凝土砖中加入涤棉混纺废弃织物, 结果表明水泥基透水混凝土物理力学性能随织物体积掺量的增大得到提高。

聚丙烯纤维是有机纤维的一种, 有文献对其掺量、长度对混凝土的影响进行了研究。Wang(2012 年)在混凝土中加入纤维, 结果表明混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度随纤维掺量的增加而增加; 詹冬(2014 年)的试验结果表明: 添加纤维对于混凝土的收缩有明显的影响作用, 混凝土在 28 d 后收缩率降低至 9.3%~18.9%; 陈建国(2018 年)的试验结果表明: 当聚丙烯

for Use in Roads[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9).

[12] Ana Luiza Borges Marinho, Carina Miranda Mol Santos, José Maria Franco de Carvalho, et al. Ladle Furnace Slag as Binder for Cement-Based Composites[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(11).

[13] Joaquim Nery Sant'ana Filho, Sidney Nicodemos Da Silva, Gabriela Cordeiro Silva, et al. Technical and Environmental Feasibility of Interlocking Concrete Pavers with Iron Ore Tailings from Tailings Dams[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9).

[14] Santos Rodrigo Felipe, De Cássia Silva Sant'Ana Alvarenga Rita, Cardoso Mendes Beatriz, et al. Evaluation of Incorporation of Dregs in Mortar Production in Replacement of Hydrated Lime[J]. Materials Science Fo-

rum, 2017, 881: 351-356.

[15] 王一峰, 刘晶磊, 王奥运, 等. DHT 土凝岩改良铁尾矿路用性能正交试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2017(4).

[16] 汲平, 迟朝明. DHT 土凝岩稳定材料耐久性试验研究[J]. 工程建设与设计, 2017(23).

[17] 荣云杰. DHT 土凝岩土壤固化剂稳定细粒土的固化特性研究[D]. 山东农业大学硕士学位论文, 2016.

[18] 付延凯, 刘经强, 荣云杰, 等. 土凝岩的掺量和龄期对稳定土渗透系数的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016(2).

[19] Yuksel Yilmaz, Haluk Sinan Coban, Bora Cetin A. M. ASCE, et al. Use of Standard and Off-Spec Fly Ashes for Soil Stabilization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(2).

收稿日期: 2020-03-11

基金资助: 山东省高等学校科技计划项目(编号: J17KA213)

作者简介: 单景松, 男, 博士, 副教授. E-mail: cyhsjs@163.com

纤维掺量增加时,混凝土抗压强度逐渐降低,劈裂强度先增长后下降,掺量为 0.9 kg/m^3 时,劈裂强度达到最高;张洁(2018 年)研究了聚丙烯纤维对水泥土干湿循环耐久性能的影响,发现随着聚丙烯纤维掺量及长度的增加,水泥土无侧限抗压强度增大、抵抗干湿循环性能增强。

适量的聚丙烯纤维加入到混凝土中,可有效控制微裂纹的产生和扩展,提高其抗裂性能。N. Banthia (2012 年)发现聚丙烯纤维可以控制混凝土早期裂纹的产生和发展,解决裂纹尖端产生的应力集中问题;张恒(2016 年)研究了钢纤维、聚丙烯纤维对抗弯拉强度和抗裂性能的影响,发现聚丙烯纤维对混凝土抗裂性能的改善比钢纤维更有效;Korucu H(2016 年)和 Zhang H(2018 年)在混凝土中加入聚丙烯纤维显著提高了冲击荷载下混凝土的性能;刘新荣(2018 年)发现混掺聚丙烯粗、细纤维可使混凝土各个时期的抗冲击性能均得到提高。

与普通密实型混凝土相比,透水水泥混凝土空隙率较大,整体强度偏低,使用过程中常出现强度不足、表面松散等病害。该文将聚丙烯纤维掺入透水水泥混凝土中,拟增强透水混凝土颗粒间的黏结能力,改善颗粒间连接韧性。

1 聚丙烯纤维透水水泥混凝土制备

1.1 试验原材料

试验水泥选用强度为 42.5 级的普通硅酸盐水泥。骨料选用 3 种规格玄武岩骨料 ($2.36\sim4.75$ 、 $4.75\sim9.5$ 、 $9.5\sim13.2\text{ mm}$)。选用的聚丙烯纤维如图 1、表 1 所示。水选用可饮用自来水。



图 1 聚丙烯纤维

表 1 聚丙烯纤维物理性能

密度/ 颜色	单丝 直径/ μm	平均 长度/ mm	抗拉 强度/ MPa	弹性 模量/ GPa	断裂 伸长 率/%
白色	0.91	15~45	6、12、18	≥ 400	≥ 3.5
					8~30

1.2 配合比设计

为避免透水水泥混凝土在拌和过程中水泥浆离析,水灰比通常控制为 $0.25\sim0.4$ 。为确保透排水功能,目标空隙率一般在 $15\%\sim25\%$ 间选取。3 种骨料粒径 $2.36\sim4.75$ 、 $4.75\sim9.5$ 、 $9.5\sim13.2\text{ mm}$ 比例为 $10:80:10$,首先通过试验确定骨料间隙率,进而根据目标空隙率确定水泥和水用量。配合比设计如表 2 所示。

表 2 透水混凝土配合比

骨料用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水泥用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水灰比	水/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	目标空隙 率/%
1 617	350	0.30	105	18

1.3 试件制备

纤维选用 6、12、18 mm3 种长度,每种长度纤维掺量为 1.0 、 1.5 、 2.0 kg/m^3 ,每组制备 6 块透水水泥混凝土试块。

依据聚丙烯纤维的特征,采取分步投料法,先将骨料投入到搅拌机内搅拌 30 s,然后添加 $1/3$ 的水搅拌 30 s,再投入 $1/2$ 的水泥搅拌 60 s,紧接着投入剩余的水泥,并且边搅拌边将剩下的水加入拌和料中,拌和至 30 s 时将聚丙烯纤维分散均匀地投入拌和缸内,最后搅拌 90 s 出料。

采用击实法,通过控制重锤重量 (8 kg)、重锤高度、击实次数 (40 次) 保证透水水泥混凝土的成型密实度。成型后试块如图 2 所示。将成型的透水水泥混凝土试件放置在标准养护箱内,养护至 7、28 d 分别用于后续相关试验。

试件养护后采用体积法进行连通空隙率测试,测试结果表明连通空隙率随纤维掺量增加而增加,因而试件成型时随纤维掺加量不同适当调整击实功,使各试件的连通空隙率控制为 $14\%\pm0.5\%$ 。渗水系数以单位时间通过试件单位表面积的渗水量表示,测试结果为 $0.055\sim0.06\text{ cm/s}$ 。



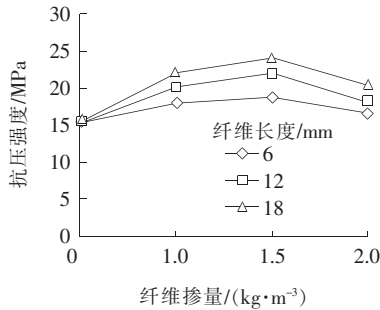
图 2 待养护试块

2 聚丙烯纤维透水水泥混凝土力学性能试验

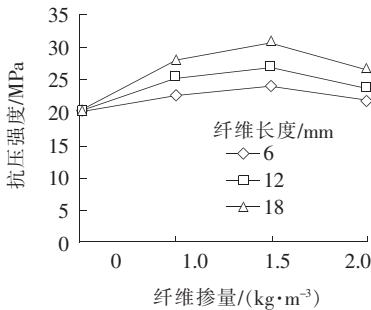
2.1 聚丙烯纤维透水水泥混凝土抗压强度

依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，将相同条件下制备成型的试件分成两组，7、28 d 龄期时各取 1 组进行试验。破坏后的荷载峰值乘以非标准尺寸下的换算系数 0.95，得到试块的抗压强度。

透水水泥混凝土 7、28 d 的抗压强度与纤维掺量、长度的变化关系如图 3 所示。



(a) 7 d



(b) 28 d

图 3 抗压强度试验结果

由图 3 可知：

(1) 不同龄期下纤维的加入可显著增加透水混凝土强度，随纤维掺量的增加，透水水泥混凝土抗压强度呈先上升后下降的趋势，试验的 3 种纤维长度都在掺量为 1.5 kg/m³ 时抗压强度达到最大，如长度为 12 mm 时，掺量从 0 增加到 1.5 kg/m³ 时，抗压强度值从 15.6 MPa 升至 22.1 MPa，升高了 41.7%。

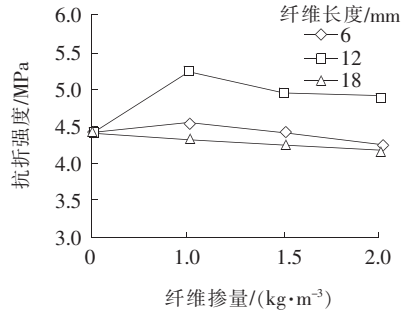
(2) 纤维长度对透水混凝土抗压强度有一定的影响，试验中纤维长度为 18 mm 时对抗压强度的增强效果最明显，其次为 12 mm，纤维长 6 mm 时影响最小。以纤维最佳掺量 1.5 kg/m³ 为例，纤维长度为 6、18 mm 时，其对应的抗压强度分别为 18.9、24.2 MPa。

因而，从提高抗压强度角度，纤维掺量可采取 1.5 kg/m³，纤维长度采取 18 mm。

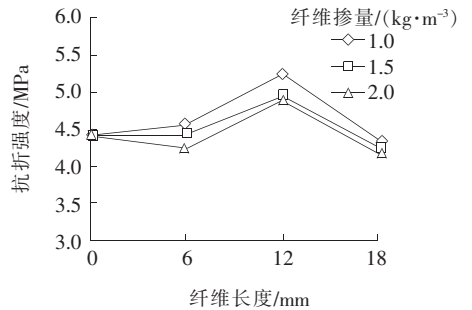
2.2 聚丙烯纤维透水水泥混凝土抗折强度试验

根据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，取相同条件下制备成型的小梁试件，养护至 28 d 进行抗折强度试验。加载至试件损坏后，损坏荷载值乘以非标准尺寸下的换算系数 0.85，得到透水混凝土试件的抗折强度。

纤维掺量和长度对抗折强度的影响如图 4 所示。



(a) 纤维掺量对抗折强度影响



(b) 纤维长度对抗折强度影响

图 4 抗折强度试验结果

由图 4 可知：

(1) 当纤维较短时（试验中 6 mm 和 12 mm），抗折强度随纤维掺量的增加呈先升后降的变化趋势，在纤维掺量为 1.0 kg/m³ 时达到最大，随后逐渐降低。当纤维较长时（18 mm），掺加纤维后透水混凝土抗折强度呈单调下降趋势。

(2) 不同纤维掺量下，纤维长度为 12 mm 时透水混凝土抗折强度增加幅度最大，纤维长度增加或减小时，抗折强度均有所降低。因此，纤维长度对抗折强度有一定的影响，根据该文试验结果，纤维长度为 12 mm 时比较有利。

综上所述，从抗折强度角度考虑，聚丙烯纤维掺量为 1.0 kg/m³、长度为 12 mm 时对透水混凝土抗折强度提高最明显。由此可见，当抗折强度达到最大值时，纤维掺量和纤维长度与抗压强度最大值时不同。这是

因为聚丙烯纤维跟水泥骨料拌和后随机分布于透水混凝土中,试件破坏时主要通过桥接微观裂缝界面增强试件的强度。纤维较短时,易被拔出而起不到加筋的作用,若纤维太长则面临结团不能分散均匀的问题,因而纤维应有合理的长度范围。抗压强度试验过程中,试件受到挤压作用整体出现许多微观裂缝,这时纤维的桥接加固作用发挥比较充分,较长的纤维可同时桥接多个微裂缝。与抗压试验不同,抗折试验过程中微观裂缝较集中地出现于小梁试件跨径中部区域,进而发展成由下而上的宏观裂缝。这一过程中主要是水平向分布纤维起作用,同一掺量下若纤维较短则数量就会增加,在某一平衡点会达到最好的加筋效果。

3 聚丙烯纤维透水水泥混凝土冻融循环试验

冻融循环试验分两种湿度状况进行:① 饱水状态,即冻融循环过程中试件都浸泡于防冻液中;② 湿润状态,即冻融循环试验前先将试件饱水浸泡,取出试件后空隙水自然排出,然后直接进行冻融循环试验。两种湿度状态对比,主要考虑透水混凝土具有透排水能力,实际使用过程中处于饱水冰冻状态较少,多数情况为雨雪天气后的湿润状态冰冻。

根据前文试验结果,选用掺量为 1.5 kg/m^3 的成型试块。冻融循环时将同批次成型试件放入冻融箱,分成3组,冻融循环75、150和225次时,分别取出1组试件进行试验。

在饱水和湿润状态下,透水水泥混凝土抗压强度与冻融次数之间的变化关系如图5所示。测试后抗压强度与初始抗压强度的比值为残余强度比,透水水泥混凝土残余抗压强度比与冻融循环次数之间的变化关系如图6所示。

由图5、6可知:

(1) 饱水状态下,随着冻融循环次数增多透水水泥混凝土抗压强度值明显下降,特别是零纤维时的透水水泥混凝土抗压强度下降尤其明显。加入纤维后可明显改善透水水泥混凝土的抗冻融能力,纤维长度为6、12和18 mm时,冻融循环225次后抗压强度降低幅度分别为41.7%、29.2%和22%。因此,掺加18 mm长度的聚丙烯纤维对改进透水水泥混凝土抗冻融机能最有益。

(2) 在湿润状态下,透水水泥混凝土抗压强度随冻融循环次数的增多而下降,但转变幅度明显小于饱

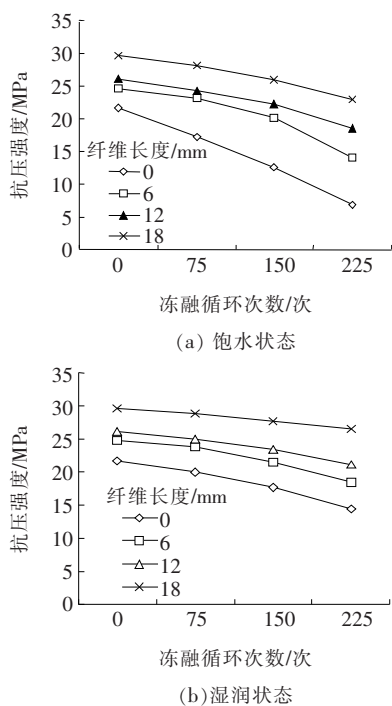


图5 透水水泥混凝土抗压强度随冻融循环次数变化

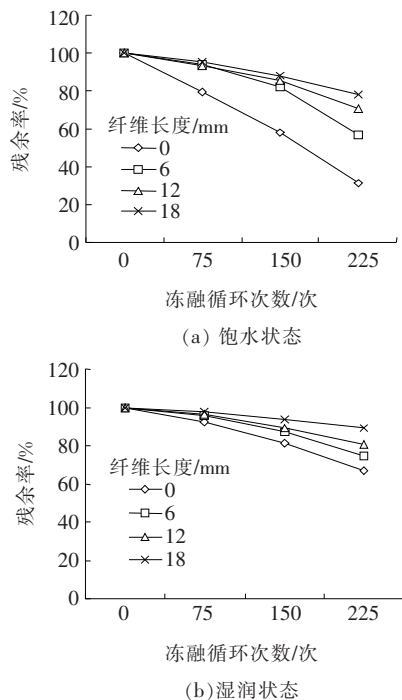


图6 透水水泥混凝土残余抗压强度比随冻融循环次数变化

水状态。加入纤维对提升湿润状态下的抗冻融能力也有一定的作用,如纤维长度为6、12和18 mm时,冻融循环225次后抗压强度降低幅度分别为25.4%、19.0%和10.5%。由此可知,掺加18 mm长聚丙烯纤维对改进湿润状态透水水泥混凝土抗冻融机能最明显,这与饱水冻融循环试验结果一致,说明添加18

mm 长纤维对提升抗冻融能力最有益。

(3) 残余强度比随冻融循环次数增多呈加速变小趋势,说明冻融循环过程中试件的破坏劣化速度是逐渐加速的。饱水状态下冻融循环 150 次之内,试件的残余抗压强度比比较接近,都在 85% 以上,但随着冻融次数的进一步增加,掺加 6 mm 纤维试块的残余强度比降低最快,其次是 12 mm 纤维试块,降低最慢的为掺加 18 mm 长纤维试块,冻融 225 次后残余强度比分别为 57%、70.8% 和 78%。相对来讲,湿润状态下试件的冻融劣化速度相对较慢,冻融 150 次后,掺加 3 种纤维试件的残余强度比都在 89% 以上,冻融 225 次后,残余强度比都在 74% 以上。

4 结 论

在透水水泥混凝土中加入不同长度、不同掺量的聚丙烯纤维,通过抗压、抗折和冻融循环试验,分析了掺加纤维对透水水泥混凝土受力性能的影响,得出以下主要结论:

(1) 透水水泥混凝土的抗压强度随着纤维掺量的增加呈先上升后下降的趋势,在 1.5 kg/m^3 时达到最大抗压强度值。纤维长度对透水水泥混凝土抗压强度也有明显影响,对该文试验的 6、12、18 mm 3 种纤维长度而言,长度 18 mm 纤维对抗压强度增加最大。

(2) 抗折强度试验表明,纤维长度较短时(6、12 mm),随纤维掺量增加抗折强度先增加后减小,而纤维较长时(18 mm),增加纤维掺量导致抗折强度持续降低。在纤维长度 12 mm、掺量为 1.0 kg/m^3 时,透水水泥混凝土达到最大抗折强度值。

(3) 掺加聚丙烯纤维可明显增强透水水泥混凝土抗冻融能力,特别对饱水状态下的透水水泥混凝土抗压强度提高最为明显。饱水状态下经过 225 次冻融循环后,无纤维透水水泥混凝土残留强度比跌至 31%,而掺加 1.5 kg/m^3 纤维后残余强度比增至 57% 以上,掺加 18 mm 长纤维使残余强度比增加最多,提高至 78%。

(4) 可根据透水混凝土的实际应用场合确定合理的纤维掺量和纤维长度,如铺装较厚、外部荷载较小时,可选用长度 18 mm、掺量为 1.5 kg/m^3 。若透水混凝土铺装层承受明显的弯拉作用时,可综合考虑强度和长期冻融性能,选用长度 12 mm、掺量 $1.0 \sim 1.5 \text{ kg/m}^3$ 纤维。

参考文献:

- [1] 张艳聪,仲俊敏. 废轮胎钢纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 中外公路,2018(5).
- [2] 张丽,刘梁森,吴晓青,等. 含涤废弃织物增强水泥基透水砖的制备及表征[J]. 复合材料学报,2016(4).
- [3] Wang HW. Effect of Polypropylene Fiber on Mechanical Properties of Concrete Containing Fly Ash[J]. Advanced Materials Research,2012, 346: 26—29.
- [4] 詹冬,金宝宏. 聚丙烯纤维混凝土抗压强度与收缩性能时变规律研究[J]. 宁夏工程技术,2014(2).
- [5] 陈建国,张世城,陈国庆,等. 双掺偏高岭土及聚丙烯纤维对混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土,2018(8).
- [6] 张洁. 聚丙烯纤维水泥土抗压强度及干湿循环耐久性性能试验研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [7] 张磊,张永存,晃鹏超. 基于试验分析的聚丙烯纤维混凝土抗裂性研究[J]. 河南城建学院学报,2017(3).
- [8] Wang J Y, Banthia N, Zhang M H. Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Flexural Behaviors of Fiber Reinforced Cementitious Composites[J]. Cement and Concrete Composites,2012,34(4):443—450.
- [9] 张恒. 多尺度纤维混杂对水泥混凝土性能的影响[J]. 中外公路,2016(6).
- [10] Korucu H. Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Plates under Fluid Impact. Part I: Experiments[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2016, 60(2): 211—223.
- [11] Zhang H, Wang L, Zheng K, et al. Research on Compressive Impact Dynamic Behavior and Constitutive Model of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187: 584—595.
- [12] 刘新荣,柯炜,梁宁慧,等. 基于 SHPB 试验的多尺寸聚丙烯纤维混凝土动态力学性能研究[J]. 材料导报,2018(S1).
- [13] Neithalath N, Bentz D P, Sumanasooriya M S. Advances in Pore Structure Characterization and Performance Prediction of Pervious Concretes[J]. Concrete International, 2010,32(5):35—40.
- [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).
- [15] 顾晓帆. 透水混凝土制备及其性能试验研究[D]. 青岛理工大学硕士学位论文,2018.
- [16] 雷丽恒,刘荣桂. 透水性道路用生态混凝土性能的试验研究[J]. 混凝土,2009(9).