

纳米硅+聚丙烯纤维复合改性透水混凝土性能研究

刘本立¹,张朋¹,单景松^{2*},赵海舰¹,苏本君¹,李超³

(1.山东省公路桥梁建设集团有限公司,山东 济南 250000; 2.山东科技大学,山东 青岛 266590;

3.潍坊市自然资源和规划局 潍城分局,山东 潍坊 261021)

摘要:为提升透水混凝土的综合性能,将纳米硅与聚丙烯纤维添加于透水混凝土中,研究复合改性透水混凝土的性能。首先,探讨单掺纳米硅对水泥净浆及透水混凝土性能的影响,确定纳米硅掺量与最佳水胶比,以此为基础复掺不同比例的聚丙烯纤维,并确定合理的聚丙烯纤维掺量。试验结果表明:纳米硅的加入,提高了透水混凝土空隙率,同时增加了最佳水胶比。当纳米硅掺量为0.5%、水胶比为0.32时,透水混凝土抗压强度最高。在此基础上,复掺1.0 kg/m³聚丙烯纤维可得到最大抗压强度,7 d与28 d抗压强度分别提高了29.9%、42.2%。复掺1.5 kg/m³聚丙烯纤维对改善透水混凝土抗冻性能最为显著,经过300次冻融循环后,抗压强度和抗折强度残余率仍可达到65%和75%,远高于单掺纳米硅时的45%和55%。

关键词:纳米硅;聚丙烯纤维;抗压强度;空隙率;抗冻性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Performance of Composite Modified Permeable Concrete with Nano-Silicon and Polypropylene Fiber

LIU Benli¹, ZHANG Peng¹, SHAN Jingsong^{2*}, ZHAO Haijian¹, SU Benjun¹, LI Chao³

(1. Shandong Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China; 2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 3. Weicheng Branch Bureau, Department of Natural Resources of Weifang City, Weifang, Shandong 261021, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive performance of permeable concrete, nano-silicon and polypropylene fiber were added to permeable concrete to study the performance of the composite modified permeable concrete. Firstly, the influence of single-doped nano-silicon on the performance of cement paste and permeable concrete was studied, and the content of nano-silicon and the optimal water-to-binder ratio were determined. On this basis, different proportions of polypropylene fiber were mixed, and the reasonable content of polypropylene fiber was determined. The results show that nano-silicon improves the porosity of permeable concrete and increases the optimal water-to-binder ratio. When the content of nano-silicon is 0.5%, and the water-to-binder ratio is 0.32, the compressive strength of permeable concrete is the highest. Based on this ratio, the maximum compressive strength can be obtained by adding 1.0 kg/m³ polypropylene fiber, and the compressive strength after 7 d and 28 d is increased by 29.9% and 42.2%, respectively. Adding 1.5 kg/m³ polypropylene fiber has the most significant effect in improving the frost resistance of permeable concrete. After 300 freeze-thaw cycles, the residual rate of compressive strength and flexural strength are 62% and 75%, respectively, which are far higher than 40% and 55% of single-doped nano-silicon.

Keywords: nano-silicon; polypropylene fiber; compressive strength; porosity; frost resistance

收稿日期:2023-08-21

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(编号:ZR2021ME004)

作者简介:刘本立,男,博士,高级工程师.E-mail:1479734097@qq.com

*通信作者:单景松,男,博士,教授.E-mail:54730867@qq.com

0 前言

透水混凝土是由开级配骨料作为骨架,水泥浆体作为黏结剂,在外力作用下,堆积压实而成的多空混合材料,因具有透水、透气、吸噪等优点,被广泛应用于海绵城市建设中。但由于本身具有较多连通宏观空隙,导致其强度较低,限制了透水混凝土在实际工程领域的应用。为此,不少学者开始将外掺材料如纤维、纳米材料等^[1-4]添加于透水混凝土之中,以达到提升透水混凝土性能的目的。

纳米硅是小粒径无机材料,具有极强的火山灰活性、晶核作用以及微集料填充作用,不仅与氢氧化钙反应形成类似于 C_3S 水合的胶体硅酸钙水合物 $C-S-H$,改变硬化水泥浆体的微观结构,还能够提供反应性硅质面,加速 C_3S 的早期水化,从而提高水泥水化速度,进而提高透水混凝土宏观力学性能及耐久性能^[5-6]。如 Tarangini 等^[7]以 3% 水泥质量的纳米硅添加于透水混凝土中,研究透水混凝土的耐久性,结果表明纳米硅改性后的透水混凝土抵抗冻融能力得到有效提升,耐久性系数高达 70% 以上; Tarangini 等^[8]通过不同水灰比、细骨料比例以及添加 3% 纳米二氧化硅的组合进行试验研究,结果表明纳米硅极大提高了透水混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度以及弯曲强度,同时其透水性能仍在可接受范围之内。

聚丙烯纤维在透水混凝土中能够起到很好的增韧效果。在外力作用下,纤维在结构内部处于拉伸、拔出、断裂等不同受力状态时,在可消耗的外力作用下,能量实现了有效传递,在裂缝间起到桥连作用,显著提升了透水混凝土力学性能^[9-13]。如赵剑锋等^[14]将聚丙烯纤维应用于透水混凝土中,发现随着纤维长度的增加,抗压强度呈先增大后减小趋势,抗折强度则随着纤维长度和掺量的增大而逐渐增强; Akand 等^[15]将聚丙烯纤维进行化学处理后掺入透水混凝土中,发现聚丙烯纤维的掺入可以很好地提高透水混凝土的抗折强度和黏结力。

综上所述,添加纳米硅或聚丙烯纤维都能提升透水混凝土力学性能,且两者对透水混凝土力学性能提升机理有所不同。若将这两种材料同时添加于透水混凝土中,综合两者的优点,可能会明显提升透水混凝土的力学性能。已有研究表明:在透水混凝土

中复掺多种材料能够实现比单掺更优的性能^[16]。因此,本文将纳米硅和聚丙烯纤维共同添加于透水混凝土中,探究复合添加料对透水混凝土性能的影响。

1 试验原材料及试块成型方法

1.1 试验原材料

透水混凝土所用水泥为普通硅酸盐水泥 P42.5R,水为本地自来水,减水剂为高效聚羧酸混凝土减水剂,骨料为玄武岩骨料,级配为 4.75~9.5 mm (80%),9.5~13.2 mm (20%)。纳米硅为气相纳米二氧化硅,其基本性能见表 1,所采用纤维为聚丙烯纤维,其基本性能见表 2。

表 1 纳米二氧化硅性能指标

名称	平均粒径/nm	W(SiO ₂)/%	BET 表面积/(m ² ·g ⁻¹)
德固赛 A380	7	98	380

表 2 聚丙烯纤维性能指标

密度/(g·cm ⁻³)	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/%
0.90	17~47	18	565	5.4	13

1.2 试块成型方法

透水混凝土试件的成型方法目前尚无相关标准,考虑透水混凝土材料流动性小的特点,采用击实试验方法,对标准马歇尔自动击实仪模具进行改造,改造后的试模为 10 cm×10 cm×10 cm 立方体(图 1)。将带有套筒的试模放到马歇尔击实仪平台上,并把马歇尔击实仪上的试模锁锁紧套模的锁口,保证改造后的试模能够固定在钢块上。对比不同击实次数的试块密度,将击实次数设定为 100 次。

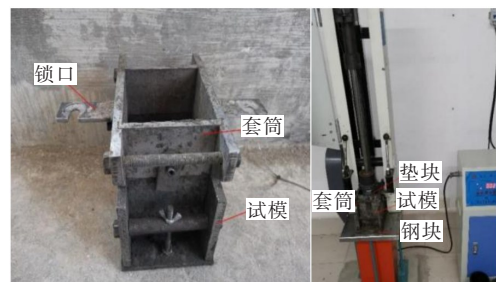


图 1 混凝土试模及马歇尔击实仪

Figure 1 Concrete test model and Marshall compactor

1.3 空隙率测定方法

根据《透水混凝土路面技术规程》(DB11/T 775—2010)测量透水混凝土试样的有效空隙率。首先称取试件烘干质量为 m_1 ,将试样在水中浸泡30 min后至饱和,称取水中质量 m_2 ,根据式(1)计算透水混凝土试样的有效空隙率 n_e 。

$$n_e = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{v\rho_w} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: v 为试样的轮廓体积(cm^3); ρ_w 为试验室自来水的密度(kg/m^3),取 $997 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

总空隙包含有效空隙和封闭空隙,总空隙率采用算法得到^[17]。根据硬化试件的毛体积密度和理论密度进行计算,如式(2)、(3)所示。

$$p_1 = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_{t1}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$\rho_{t1} = \frac{100 + P_c + 0.25 \times P_c}{\frac{100}{\rho} + \frac{P_c}{\rho_c} + P_c \times 0.25 \times 0.75} \rho_w \quad (3)$$

式中: p_1 为试件总空隙率(%); ρ_f 为试件毛体积密度(kg/m^3); ρ_{t1} 为试块的理论密度(kg/m^3); P_c 为水泥与集料质量比; ρ_c 为水泥相对密度。

1.4 冻融循环试验

为了更贴近工程实际,采用湿润状态下的混凝土试块进行冻融循环试验。具体步骤如下:试验前,先将试块饱水浸泡,再取出试件,让其空隙水自然排出,然后进行冻融循环试验。采用快冻法,循环次数设置为0次、75次、150次、225次、300次。

2 单掺纳米硅对水泥净浆及透水混凝土性能的影响

2.1 纳米硅对水泥净浆标准用水量影响

将纳米硅代替一部分水泥,同时考虑减水剂的影响,具体水泥净浆试验配合比分为8组,如表3所示。取水泥质量500 g进行试验,添加纳米硅时,减少同样质量的水泥。

参考《水泥稠度标准用水量、凝结时间、安定性检验方法》(GB/T 1346—2011),测试了掺加不同比例纳米硅与减水剂后,水泥净浆标准稠度用水量,结果见表4。

由表4可知:

(1) 随着纳米硅掺量的增加,水泥净浆标准稠度

表3 水泥净浆材料组成

编号	水泥/g	纳米硅/%	减水剂/g
1	500.0	0.0	0.0
2	497.5	0.5	0.0
3	495.0	1.0	0.0
4	492.5	1.5	0.0
5	485.0	3.0	0.0
6	485.0	3.0	3.5
7	485.0	3.0	5.0
8	485.0	3.0	6.5

表4 试验结果

编号	用水量/mL	水胶比	编号	用水量/mL	水胶比
1	129.6	0.26	5	191.5	0.38
2	141.6	0.28	6	187.5	0.38
3	154.6	0.31	7	180.5	0.36
4	167.5	0.34	8	176.5	0.35

用水量大幅度增加,如纳米硅掺量为3%时,水泥净浆用水量为191.5 mL,比无纳米硅的水泥净浆标准稠度用水量高出47.7%。这主要是因为随着纳米硅掺量的增加,纳米硅产生团聚吸收大量水分所致,其次是纳米硅的比表面积较大,颗粒表面湿润需要大量水分,而且具有较大的吸附力,约束了水泥浆内大量的自由水^[18]。

(2) 随着减水剂掺量的增加,掺纳米硅水泥浆标准稠度用水量逐渐减小,如本试验中掺入3%纳米硅的水泥浆体,减水剂为6.5 g时,纳米硅水泥浆标准稠度用水量为176.5 mL,比不掺减水剂水泥浆标准稠度用水量低7.8%,说明减水剂对缓解纳米硅的团聚有一定程度的改善。考虑透水混凝土的多孔结构特征,用水比例大时可能导致水泥浆流动堵塞空隙,还可能引起水泥浆与骨料界面过渡区微细空隙增多。因而,添加纳米硅的同时应添加合理剂量的减水剂以降低用水比例。

2.2 纳米硅对透水混凝土性能影响

2.2.1 纳米硅掺量的影响

以水泥浆体达到标准稠度为条件,测试了不同纳米硅掺量(0、0.5%、1.0%、1.5%、3.0%)透水混凝土的强度及空隙率。考虑骨料具有一定的吸水性,经初步试验后,将水胶比设为0.28、0.30、0.32、0.36、

0.40, 试验结果如图2、3所示。

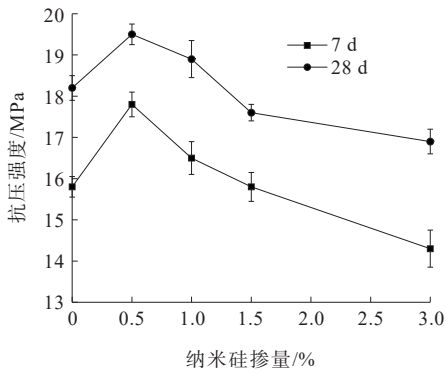


图2 纳米硅掺量对抗压强度的影响

Figure 2 Effect of nano-silicon content on compressive strength

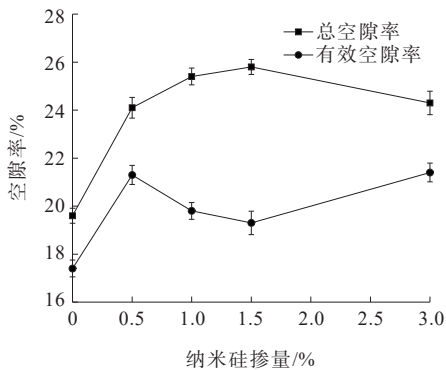


图3 纳米硅掺量对空隙率的影响

Figure 3 Effect of nano-silicon content on porosity

由图2可知:7 d与28 d抗压强度都随着纳米硅掺量增加呈先增强后减弱趋势,其中0.5%纳米硅掺量时混凝土7 d与28 d的抗压强度最高,分别为17.8 MPa、19.5 MPa,与不掺纳米硅透水混凝土7 d与28 d抗压强度相比,分别提高了12.66%、7.14%。这是因为纳米硅掺量适宜时,其引起的表面效应处于主导地位,促进了水化反应,进而提高了水化产物C-S-H含量,抗压强度得到了增强。然而,当纳米硅掺量较大时,纳米硅表面效应减弱,絮凝效应开始占主导地位,导致水化反应受到阻碍,水化产物C-S-H凝胶的生成量减少。因此,透水混凝土的抗压强度出现逐渐降低的趋势。

由图3可知:掺加纳米硅会显著增加透水混凝土总空隙率与有效空隙率。当纳米硅掺量为1.5%时,总空隙率达到最大值25.8%,与不掺纳米硅相比提高了24%。这主要是因为随着纳米硅的掺入,水泥浆体的黏聚性逐渐增强。在击实成型过程中,骨料颗粒的移动相对困难,需要较大的外功才能使骨料相

互嵌锁达到紧密堆积状态。因此,依据本文的成型方法,在相同击实功下掺纳米硅后的透水混凝土总空隙率呈显著增加趋势。

有效空隙率在纳米硅掺量小于0.5%时明显增加,而后随纳米硅掺量增加呈先下降后增长趋势。这是因为掺加少量纳米硅时,击实成型困难造成了连通空隙的增加,随纳米硅掺量增加,水泥与纳米硅二次反应过程中产生较多的C-S-H凝胶,且由于晶核效应,晶核不断生长,试件内部形成大量封闭空隙。此时,尽管透水混凝土总空隙率增加,但是内部封闭空隙的增长量更大,因而连通空隙率呈降低趋势。当纳米硅掺量超过1.5%时,纳米硅不能充分分散,黏附在水泥颗粒表面,阻碍了水泥水化,C-S-H凝胶生成量减少,进而导致有效空隙率再次提升。

综合考虑材料的强度和空隙率,确定纳米硅掺量0.5%时为最优配比。

2.2.2 水胶比的影响

以纳米硅掺量为0.5%为基础,研究了不同水胶比(0.28、0.30、0.32、0.34)对透水混凝土抗压强度及空隙率的影响,试验结果如图4、5所示。

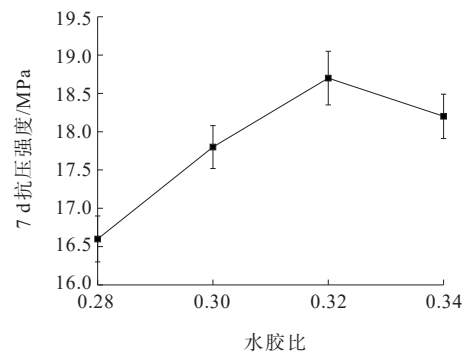


图4 水胶比对抗压强度的影响

Figure 4 Effect of glue ratio on compressive strength

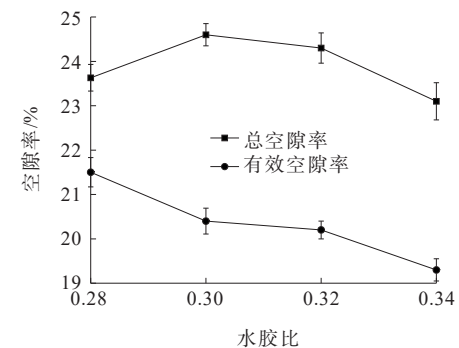


图5 水胶比对空隙率的影响

Figure 5 Effect of water-to-binder ratio on porosity

由图4、5可知:7 d抗压强度随着水胶比增大呈先增强后减弱趋势。这是因为当水胶比较低时,水化反应所需要的水分量不足,从而减少了水化产物生成,降低了骨料颗粒间的黏结性能;随着水胶比增大,水化产物增多,改善了骨料颗粒间的黏结性,透水混凝土整体抗压强度开始逐渐增强,水胶比为0.32时达到极值18.7 MPa。随水胶比的持续增加,水泥浆体流动性增加,在成型过程中浆体易向下积聚离析,浆体包裹骨料的均匀性降低,导致混凝土整体抗压强度逐渐降低,此时透水混凝土的总空隙率(水胶比 ≥ 0.3)与有效空隙率呈下降趋势。

基于以上分析,综合考虑透水混凝土强度和渗水性能,纳米硅掺量0.5%、水胶比0.30~0.32时性能最优。

3 纳米硅+聚丙烯纤维复合改性透水水泥混凝土性能

前文研究了纳米硅对透水混凝土性能影响,本节在纳米硅掺量0.5%、水胶比0.32情况下复掺长度为18 mm的聚丙烯纤维,纤维掺量范围为0~2 kg/m³,探究复合掺加纳米硅与纤维对透水混凝土性能的影响。

3.1 空隙率

加入聚丙烯纤维的纳米硅混凝土的总空隙率、有效空隙率的变化规律如图6所示。

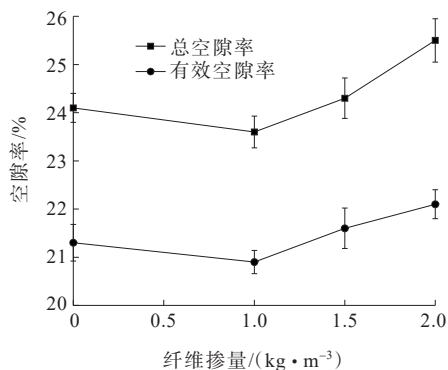


图6 纤维掺量对空隙率的影响

Figure 6 Effect of fiber content on porosity

由图6可知:空隙率随着纤维掺量的增加呈先减小后增大趋势,掺量为1.0 kg/m³时,总空隙率与有效空隙率的降幅分别为2.0%、1.8%。这是因为纤维本身具有一定体积,占据了混凝土中部分空隙,导致空隙率略有下降;纤维掺量继续增加时,由于纤维较大的比表面积需要一部分水泥浆体包裹,增加了水泥

浆的整体稠度,同时纤维对水泥浆体具有一定约束作用,使混凝土内部空隙呈增大趋势,如纤维掺量为2.0 kg/m³时,复掺纤维的透水混凝土总空隙率与有效空隙率增幅分别为5.8%、3.8%。

3.2 抗压性能

加入聚丙烯纤维的纳米硅混凝土的抗压强度如图7所示。

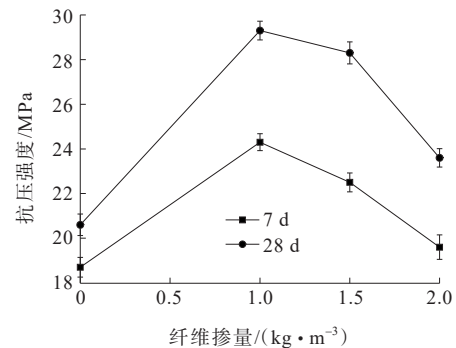


图7 纤维掺量对抗压强度的影响

Figure 7 Effect of fiber content on compressive strength

由图7可知:透水混凝土的7 d抗压强度与28 d抗压强度受纤维掺量的影响较大,呈先增长后降低趋势。纤维掺量1.0 kg/m³时,抗压强度最大,7 d、28 d抗压强度分别达到24.3 MPa、29.3 MPa。这是因为纤维掺量适中时能够均匀地分布于混凝土中,与水泥浆体形成纤维网,同时纳米硅的表面效应能够增强该网状结构强度,有效抑制混凝土内部的裂缝扩展,进而提升其抗压强度。聚丙烯纤维过多时,纤维过于密集容易结团,导致透水混凝土空隙率增加,影响水泥浆体和骨料的界面过渡区均匀性,削弱了抗压强度,如纤维掺量超过1.0 kg/m³后,抗压强度开始持续下降。因此,为提高纳米硅透水混凝土抗压强度,选用1.0 kg/m³的聚丙烯纤维掺量时效果最佳。

3.3 抗冻性能

3.3.1 冻融对抗压强度的影响

图8、9为掺入聚丙烯纤维后,冻融对抗压强度的影响。

由图8、9可知:聚丙烯纤维的掺入对透水混凝土的抗冻性能有较大的改善作用。经过75次冻融循环后,掺纤维透水混凝土的抗压强度降低幅度较小,如复掺1.0 kg/m³聚丙烯纤维的纳米硅透水混凝土,抗压强度下降幅度仅为2%;随着冻融循环次数的增加,抗压强度的下降速率呈双增趋势,经过225次冻

融循环后,复掺 1.5 kg/m^3 和 1.0 kg/m^3 聚丙烯纤维的纳米硅透水混凝土,其抗压强度残余率分别为84%、75%,而此时不掺纤维透水混凝土的抗压强度残余率已不足70%。经过300次冻融循环后,单掺纳米硅透水混凝土的抗压强度残余率已不足45%,复掺三种比例聚丙烯纤维的纳米硅透水混凝土的抗压残余率稳定在60%左右,其中复掺 1.5 kg/m^3 聚丙烯纤维的纳米硅透水混凝土的抗压强度残余率可达65%。

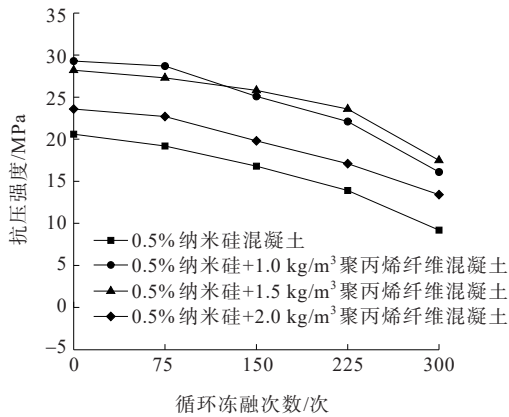


图8 循环冻融次数对抗压强度影响

Figure 8 Effect of freeze-thaw cycles on compressive strength

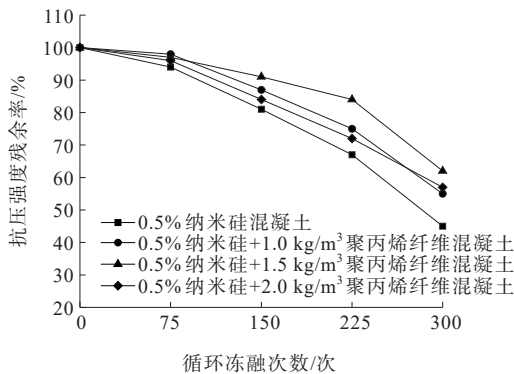


图9 循环冻融次数对抗压强度残余率影响

Figure 9 Effect of freeze-thaw cycles on residual rate of compressive strength

3.3.2 冻融对抗折强度的影响分析

冻融对抗折强度的影响见图10、11。

由图10、11可知:冻融循环对透水混凝土抗折强度的影响规律与抗压强度相似,都是随着冻融次数的增加呈下降趋势。冻融循环75次时,各组试件的抗折强度的下降幅度均较小,随着冻融次数的增加,抗折强度呈快速下降趋势,但纤维对冻融能力的增强作用明显。如冻融循环150次后,掺加0.5%纳米

硅+ 1.5 kg/m^3 聚丙烯纤维透水混凝土的抗折强度最大,抗折强度残余率可达93%;冻融循环225次后,单掺纳米硅透水混凝土抗折残余率不足75%,而复掺3种比例的聚丙烯纤维的纳米硅透水混凝土的抗折强度残余率均为85%左右;冻融循环300次后,单掺纳米硅透水混凝土的抗折残余率仅为55%,而复掺聚丙烯纤维透水混凝土的抗折强度残余率均在75%左右。

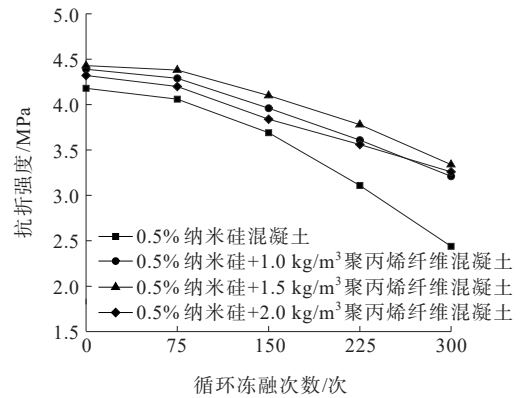


图10 循环冻融次数对抗折强度影响

Figure 10 Effect of freeze-thaw cycles on flexural strength

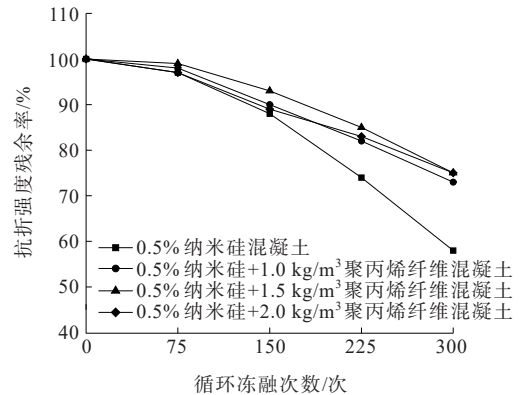


图11 循环冻融次数对抗折强度残余率影响

Figure 11 Effect of freeze-thaw cycles on residual rate of flexural strength

4 结论

研究了复掺纳米硅和聚丙烯纤维对透水混凝土空隙率、抗压性能及抗冻性能的影响,得出以下结论:

(1) 纳米硅的掺量直接影响水泥浆体标准稠度用水量,如纳米硅掺量为3%时,水泥净浆标准稠度用水量增加47.7%,此时建议加入一定量的减水剂以调整稠度。

(2) 随纳米硅掺量的增加,透水混凝土的抗压强

度先增加后减小、空隙率不断增加,纳米硅的最佳掺量为0.5%,最佳水胶比范围为0.30~0.32。

(3) 复掺适量聚丙烯纤维可显著提高透水混凝土抗压强度。当纤维掺量 1.0 kg/m^3 时,对抗压强度提高幅度最大,7 d、28 d抗压强度分别提高29.9%、42.2%。随着纤维掺量的增加,空隙率会显著增加。

(4) 复掺 1.5 kg/m^3 的聚丙烯纤维可有效提高透水混凝土的抗冻性能。经过300次冻融循环后,复掺纤维透水混凝土的抗压强度和抗折强度残余率仍能保持65%和75%,而仅掺纳米硅的混凝土,其抗压强度和抗折强度残余率仅为45%和55%。

参考文献:

References:

- [1] BRIGHT SINGH S, MURUGAN M. Performance of carbon fibre-reinforced pervious concrete (CFRPC) subjected to static, cyclic and impact loads[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(9): 3113-3128.
- [2] ALIMOHAMMADI V, MAGHFOURI M, NOURMOHAMMADI D, et al. Stormwater runoff treatment using pervious concrete modified with various nanomaterials: A comprehensive review[J]. Sustainability, 2021, 13(15): 8552.
- [3] 李振发. 纳米偏高岭土对混凝土抗冻性能的影响研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 265-269.
LI Zhenfa. Effect of nano-metakaolin on frost resistance of concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 265-269.
- [4] 边旭辉, 申爱琴, 连城, 等. 基于灰关联理论的玄武岩纤维混凝土孔与抗冻性能相关性研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 192-198.
BIAN Xuhui, SHEN Aiqin, LIAN Cheng, et al. Correlation study between pore structure and frost resistance of basalt fiber reinforced concrete based on grey correlation theory[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(4): 192-198.
- [5] MOHAMMED B S, LIEW M S, ALALOUL W S, et al. Properties of nano-silica modified pervious concrete[J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 409-422.
- [6] FENG P, CHANG H L, LIU X, et al. The significance of dispersion of nano-SiO₂ on early age hydration of cement pastes[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108320.
- [7] TARANGINI D, SRAVANA P, SRINIVASA RAO P. Effect of nano silica on frost resistance of pervious concrete[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 51: 2185-2189.
- [8] TARANGINI D, SRAVANA P, SRINIVASA RAO P. Laboratory investigations on properties of Nanosilica Pervious concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 982(1): 012009.
- [9] 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.
- [10] NHAT HO TRAN T, PUTTIWONGRAK A, PONGSOPHA P, et al. Microparticle filtration ability of pervious concrete mixed with recycled synthetic fibers[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270: 121807.
- [11] AKAND L, YANG M J, WANG X N. Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 32-39.
- [12] AL-HADITHI A I, NOAMAN A T, MOSLEH W K. Mechanical properties and impact behavior of PET fiber reinforced self-compacting concrete (SCC)[J]. Composite Structures, 2019, 224: 111021.
- [13] MASTALI M, DALVAND A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC)[J]. Construction and Building Materials, 2016, 125: 196-209.
- [14] 赵剑锋, 杨晓杰, 李好新, 等. 短切纤维对透水混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 266-271.
ZHAO Jianfeng, YANG Xiaojie, LI Haoxin, et al. Effect of chopped fibers on the performance of pervious concrete[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(2): 266-271.
- [15] AKAND L, YANG M J, WANG X N. Effectiveness of chemical treatment on polypropylene fibers as reinforcement in pervious concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 32-39.
- [16] DAI Z, LI H, ZHAO W Z, et al. Multi-modified effects of varying admixtures on the mechanical properties of pervious concrete based on optimum design of gradation and cement-aggregate ratio[J]. Construction and Building Materials, 2020, 233: 117178.
- [17] 郑木莲. 多孔混凝土排水基层研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
ZHENG Mulian. Study on porous concrete permeable base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2004.
- [18] 赵苏, 王金鹏, 关达人, 等. 吸附法制备固态聚羧酸减水剂[J]. 混凝土, 2018(11): 81-85.
ZHAO Su, WANG Jinpeng, GUAN Daren, et al. Preparation of solid polycarboxylate superplasticizer by adsorption[J]. Concrete, 2018(11): 81-85.