

聚丙烯纤维和粉煤灰对透水混凝土力学及抗冻性能分析

薛 刚

(四川工业科技学院, 德阳 618500)

摘 要: 针对透水混凝土力学性能和抗冻性能较差的问题, 采用粉煤灰部分替代水泥, 并掺入聚丙烯纤维对透水混凝土进行改性。制备了一系列掺粉煤灰、聚丙烯纤维的透水混凝土试件, 系统分析了透水性能、力学强度、耐磨性能、抗冻性能的演变规律。结果表明: 粉煤灰掺量为 10% 时透水性能最佳, 随聚丙烯纤维掺量增加, 连通孔隙率减小、透水系数先增后减, 透水性能随纤维长度增加而降低; 随粉煤灰掺量增加, 90 d 抗压、抗折强度先增后减, 掺量为 15% 时最优, 抗压强度增幅高于抗折强度; 聚丙烯纤维长度为 16 mm, 掺量为 7 kg/m^3 时力学强度、耐磨性能、抗冻性能最佳。研究成果可为透水混凝土工程应用提供参考依据。

关键词: 聚丙烯纤维; 粉煤灰; 透水混凝土; 改性机理

中图分类号: TU528, U414

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 04-0037-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.04.006

Analysis on Mechanical and Frost Resistance Properties of Pervious Concrete Mixed with Polypropylene Fiber and Fly Ash

XUE Gang

(Sichuan Institute of Industrial Technology, Deyang 618500, China)

Abstract: To address the issues of poor mechanical properties and freeze-thaw resistance of pervious concrete, fly ash was used as a partial replacement for cement, and polypropylene fibers were incorporated to modify the pervious concrete. A series of pervious concrete specimens with fly ash and polypropylene fibers were prepared, and the evolution of water permeability, mechanical strength, abrasion resistance, and freeze-thaw resistance was systematically analyzed. The results indicate that the optimal water permeability is achieved when the fly ash content is 15%. As the polypropylene fiber content increases, the connected porosity decreases, while the permeability coefficient first increases and then decreases. The water permeability decreases with increasing fiber length. With the increase in fly ash content, both the 90-day compressive strength and flexural strength first increase and then decrease, reaching their optimum at a fly ash content of 15%, with a greater increase in compressive strength than in flexural strength. The optimal mechanical strength, abrasion resistance, and freeze-thaw resistance are achieved with polypropylene fibers of 16 mm in length and a content of 7 kg/m^3 . The research findings can provide a reference for the engineering application of pervious concrete.

Key words: polypropylene fiber; fly ash; pervious concrete; modification mechanism

项目来源: 四川工业科技学院 2024 年校级项目 (GKY24A05)。

作者简介: 薛 刚 (1978—), 男, 硕士, 高级讲师, 研究方向: 中小型水利工程抢险加固。

收稿日期: 2026-02-28

材料科学

0 引言

海绵城市理念在城市现代化发展中日益受到重视，透水混凝土路面是其重要实现载体之一。该类路面能够有效控制地表径流、补给地下水并具有显著的节水效益，因此被广泛应用于城市人行道、停车场等区域的铺装^[1-2]。透水混凝土的透水能力主要取决于其内部连通孔隙率。然而，孔隙率与力学性能之间存在突出矛盾，追求高孔隙率以提升透水能力，会显著削弱混凝土的力学强度和耐久性；反之，采用低孔隙率虽能保证较好的力学强度，但在使用过程中极易发生堵塞，严重制约了透水混凝土的推广与应用^[3]。

部分学者采用纤维和胶凝材料制备具有高透水性能和力学强度的混凝土。周玉玲等^[4]采用掺入粉煤灰、硅灰和橡胶粉制备透水混凝土，结果表明掺20%矿物材料、25%橡胶粉时力学强度最高；李子成等^[5]研究认为，双掺15%粉煤灰和10%钢渣时，透水混凝土28 d抗压强度可提高5 MPa；孙杰等^[6]、高理想等^[7]进行了粉煤灰对透水混凝土影响的室内试验，结果表明粉煤灰会降低混凝土透水系数，掺量为15%时，抗压与弯拉强度最优；何松松等^[8]复配硅粉、矿粉、乳胶粉、粉煤灰组成超细矿粉制备透水混凝土，结果发现超细矿粉掺量为9%时兼具较佳的透水和力学性能；陈守开等^[9]研究了不同聚丙烯纤维、玄武岩纤维尺寸和掺量对再生骨料透水混凝土性能的影响，结果表明聚丙烯纤维体积掺量为0.3%时整体性能最佳；辛志鹏等^[10]研究表明，随聚丙烯纤维掺量增加，红砖再生骨料透水混凝土透水性能下降、力学强度提高；随粉煤灰掺量增加，透水性能和力学强度先增大后减小；张玉斌等^[11]进行了单掺或复掺PVA、PE纤维高强度透水混凝土抗弯试验，结果表明单掺PVA纤维效果优于PE纤维，混杂纤维效果最优，但透水系数下降最显著；徐丽娜等^[12]研究表明，硅灰掺量为10%时混凝土具有良好透水性能，力学性能最优，复掺6kg/m³聚丙烯仿钢纤维时力学强度增幅最大，透水系数未有显著降低；单景松等^[13]进行了不同聚丙烯纤维长度、掺量时透水混凝土力学强度试验，结果表明纤维长度变化对透水性能影响显著，长度为18 mm时最优；林海威等^[14]指出聚丙烯束状纤维分散性不佳，增强透水

混凝土性能效果低于聚丙烯塑钢纤维；胡军安等^[15]研究表明，纤维再生骨料透水混凝土透水系数随再生骨料掺量增加而增大，50%再生骨料掺量时力学强度最高。

为探究聚丙烯纤维、粉煤灰改善透水混凝土性能的影响规律，采用粉煤灰、聚丙烯纤维对透水混凝土进行改性试验，研究了粉煤灰、聚丙烯纤维掺量以及聚丙烯纤维长度变化对透水混凝土的透水性能、力学强度、耐磨性能以及抗冻性能的影响规律，以期能为透水混凝土的工程应用提供理论依据与参考。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

聚丙烯纤维，密度910 kg/m³，直径60 μm，抗拉强度280 MPa，弹性模量为3 800 MPa，断裂伸长率为7.5%。粉煤灰，F类Ⅰ级，密度为2.41 g/cm³，比表面积为460 m²/kg，化学成分见表1。采用P·O 42.5级普通硅酸盐水泥，密度为3.26 g/cm³，比表面积为335 m²/kg。骨料为花岗岩碎石，粒径为9.5~13 mm，堆积密度为1 650 kg/m³，表观密度为2 670 kg/m³，吸水率2.3%。采用聚羧酸减水剂，试验用水为自来水。

表1 粉煤灰化学成分

Table 1 Chemical composition of fly ash /%					
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
1.7	59.7	29.4	5.6	1.4	1.2

1.2 试验配合比

依据CJJ/T 135—2009《透水水泥混凝土路面技术规程》（2023年版）（下文简称为“规程”）进行计算，设定水胶比为0.3，胶石比为0.2，目标孔隙率为20%。粉煤灰替代水泥质量分数分别为5%、10%、15%、20%，聚丙烯纤维掺量分别为3、5、7、9 kg/m³，纤维长度分别为8、12、16、20 mm。透水混凝土配合比见表2，共制备12组透水混凝土试件，基准组F00试件不掺粉煤灰和聚丙烯纤维。

1.3 试验方法

先将骨料与聚丙烯纤维混合，干拌1 min（未掺纤维无此步骤）；加入50%拌合水和减水剂，搅拌1 min；加入水泥、粉煤灰，搅拌2 min；最后加入剩余拌合水，搅拌1 min。试件浇筑完后静置24 h拆模，然后进行水中养护至设定龄期。

表 2 透水混凝土配合比
Table 2 Mix proportion of permeable concrete

编号	水泥	粉煤灰	聚丙烯纤维	碎石	水	粉煤灰替代率/%	聚丙烯纤维长度/mm
	原材料/ (kg/m ³)						
F00	320			1 610	102		
F05	304	16		1 610	102	5	
F10	288	32		1 610	102	10	
F15	272	48		1 610	102	15	
F20	256	64		1 610	102	20	
P3L12	272	48	3	1 610	102	15	12
P5L12	272	48	5	1 610	102	15	12
P7L12	272	48	7	1 610	102	15	12
P9L12	272	48	9	1 610	102	15	12
P7L8	272	48	7	1 610	102	15	8
P7L16	272	48	7	1 610	102	15	16
P7L20	272	48	7	1 610	102	15	20

透水性能、抗压强度、抗冻性能、耐磨性能试验试件尺寸均为 150 mm×150 mm×150 mm。透水性能试验分为连通孔隙率和透水系数试验，试验方法依据“规程”开展，试件养护龄期为 28 d。

抗压强度、抗折强度试验依据 JTG 3420—2020《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》开展，试验采用最大加载压力为 2 000 kN 万能数显压力机。抗压强度试验加载速率为 0.5 MPa/s，抗折强度试验试件尺寸为 150 mm×150 mm×550 mm，采用四点弯曲加载方法，加载速率为 0.03 MPa/s。

抗冻性能试验采用 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中慢冻法，分别进行 5、10、15、20、25 次冻融循环时试件质量损失率和抗压强度试验。

依据“规程”开展耐磨性能试验，试件养护龄期 28 d，采用双轮耐磨试验机进行测试，磨轮载荷为 250 N，磨轮转速为 750 r/min，磨耗行程为 1 500 m，试验后测量试件表面磨坑长度，每组试验 3 个试件取平均值。

2 结果与分析

2.1 连通孔隙率和透水系数

由图 1 可知，基准组 F00 试件的连通孔隙率为 15.3%、透水系数为 4.7 mm/s；随粉煤灰掺量增加，连通孔隙率和透水系数先增后减，掺量为 10%时最大；与基准组 F00 相比，粉煤灰掺量为 5%、10%、15%、20% 的试件连通孔隙率分别增长了 3.9%、

7.2%、1.3%、-7.2%，透水系数分别增长 4.3%、8.5%、-2.1%、-17.0%。可见，适量掺入粉煤灰可提高透水混凝土的连通孔隙率和透水系数，这是因为粉煤灰呈球形颗粒形态，颗粒粒径小于水泥颗粒，适量替代水泥后可改善水泥浆体的工作性能，提高浆体的黏度，可使浆体更加均匀的黏附于骨料表面，避免浆体在骨料之间孔隙堆积，由此提高混凝土的连通孔隙率和透水系数；粉煤灰掺量为 15%时透水性能略有降低，掺量为 20%时透水性能降幅显著，这是由于水泥浆体的工作性能提高后流动性增强，浆体更易于沉降至试件底部堵塞连通孔隙，故粉煤灰掺量不宜超过 15%。

未掺聚丙烯纤维的 F15 试件连通孔隙率为 15.5%、透水系数为 4.6 mm/s，随聚丙烯纤维掺量增加，连通孔隙率减小，透水系数先增后减。与 F15 相比，聚丙烯纤维掺量为 3、5、7、9 kg/m³ 时，连通孔隙率分别降低了 2.6%、3.9%、5.2%、13.5%，而纤维掺量为 3、5 kg/m³ 时透水系数增加了 4.3%和 2.2%，掺量为 7、9 kg/m³ 时透水系数降低了 2.2%和 13.0%。可见，纤维掺量在 3~7 kg/m³ 范围时，连通孔隙率近似线性减小，掺量增加至 9 kg/m³ 时，连通孔隙率降幅迅速增大；而透水系数变化规律与连通孔隙率略有不同，掺入 3 kg/m³ 纤维透水系数呈现增大现象，这是由于加入纤维降低了水泥浆体的流动性，避免了浆体过度沉降致试件底部造成堵塞，从而有利于保持基体内透水通道；当纤维掺量增加 7~9 kg/m³ 时，过量的纤维难以在水泥浆中均匀分散，易发生团簇，团簇的纤维与骨料胶结在一起，堵塞大量连通孔隙，导致透水性能降低。

聚丙烯纤维掺量为 7 kg/m³ 时，连通孔隙率和透水系数随纤维长度增加而减小，纤维长度分别 8、12、16、20 mm 时，连通孔隙率分别为 15.1%、14.7%、13.9%、11.7%，透水系数分别为 4.7、4.5、4.1、3.3 mm/s；与纤维长度为 8 mm 试件相比，纤维长度为 12、16、20 mm 时连通孔隙率分别减小了 2.6%、7.9%、22.5%，透水系数分别减小了 4.3%、12.8%、29.8%。可见，纤维长度不超过 16 mm 时对透水性能影响较小，大于 16 mm 后透水性能显著减小；这源于长纤维降低水泥浆的流动性高于短纤维，长纤维更易于形成复杂的三维网状结

材料科学

构而封闭了基体内连通孔隙,使混凝土透水性能大大降低。

根据“规程”中透水混凝土路面连通孔隙率和透水系数最小值分别为 10% 和 0.5 mm/s,掺入聚丙烯纤维对透水混凝土的透水性能虽存在一定的影响,但各组试件的连通孔隙率和透水系数均超过“规程”最小限值要求,且均达到 JC/T 2558—2020《透水混凝土》中 K2 透水等级。

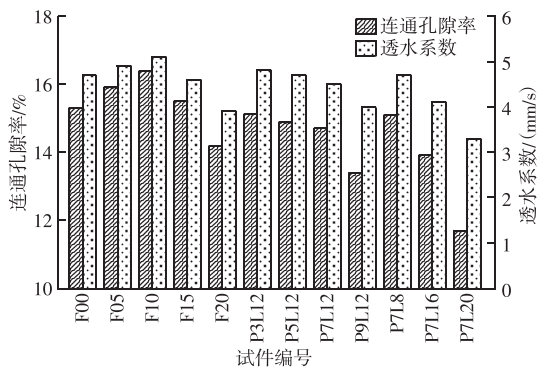


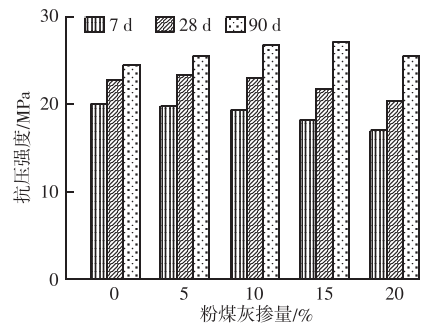
图 1 透水混凝土的连通孔隙率和透水系数

Fig. 1 Permeable pore volume and permeability coefficient of pervious concrete

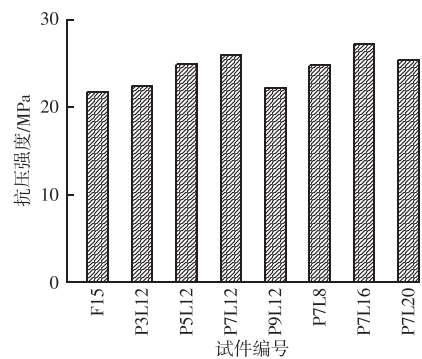
2.2 抗压强度

由图 2 (a) 可知,采用粉煤灰部分替代水泥后会导致透水混凝土早期 (7 d 龄期) 抗压强度降低,这是由于水泥用量减少使包裹骨料的水泥浆体减少,导致骨料之间的黏结强度降低;粉煤灰掺量为 5%、10%、15%、20% 试件 7 d 抗压强度分别为 19.7、19.3、18.2、16.9 MPa,相比 F00 试件分别降低了 1.4%、3.6%、9.0%、15.3%。粉煤灰透水混凝土随养护龄期增长抗压强度增幅逐渐增大,28 d 龄期,粉煤灰掺量为 5%、10% 的试件抗压强度分别为 23.3、22.9 MPa,高出 F00 试件 2.8%、0.8%,而粉煤灰掺量为 15%、20% 试件抗压强度分别为 21.7、20.3 MPa,分别低于 F00 试件 4.4%、10.7%;这是由于水泥水化反应持续进行,以及粉煤灰与水泥水化产生的氢氧化钙发生火山灰反应,生成了 C-S-H 凝胶,增强了黏结作用,使抗压强度提高。随养护时间延长至 90 d,粉煤灰的水化速率逐渐提高,使得骨料之间的黏结作用增强,粉煤灰掺量为 5%~20% 的试件抗压强度分别高出 F00 试件 4.4%、9.6%、11.1%、4.1%,掺量为 15% 时最佳。

由图 2 (b) 可知, F15 试件 28 d 抗压强度为 21.7 MPa,聚丙烯纤维长度为 12 mm,纤维掺量为 3、5、7、9 kg/m³ 试件的抗压强度分别为 22.4、24.8、25.9、22.1 MPa;相比于 F15 试件,抗压强度分别增长了 3.2%、14.3%、19.4%、1.8%。可见,抗压强度随纤维掺量增加先增后减,纤维掺量为 7 kg/m³ 时抗压强度最大,此时纤维均匀、随机分布于混凝土内部,通过桥接作用抑制基体微裂缝的产生和发展,随机的纤维网络改善了骨料之间的受力传递,纤维协同水泥浆体分散基体应力,由此控制裂缝扩展和减小裂缝扩展宽度,提高透水混凝土的抗压强度。当纤维掺量大于 7 kg/m³ 后更易产生团簇,削弱了纤维的增强作用,使抗压强度出现大幅下降。



(a) 粉煤灰掺量



(b) 聚丙烯纤维掺量、长度

图 2 透水混凝土抗压强度演变规律

Fig. 2 Evolutionary patterns of compressive strength in pervious concrete

聚丙烯纤维掺量为 7 kg/m³ 时,随纤维长度增加,抗压强度同样先增后减,纤维长度为 16 mm 时最优,抗压强度为 27.1 MPa,相比纤维长度为 8 mm 试件增长了 9.7%;这是由于短纤维的抗拔承载力小,在外力作用下多呈现为拔出破坏,导致其抑制裂缝开展能力弱,增强抗压强度效果有限。纤维长

材料科学

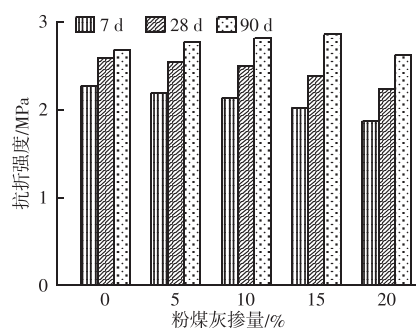
度为 20 mm 时抗压强度降低至 25.3 MPa, 相比纤维长度为 8 mm 试件仅增长了 2.4%; 这是由于长纤维分散性差, 在搅拌过程中存在聚集成团问题, 纤维聚集不仅形成了受力薄弱点, 且该部分纤维不能发挥增强作用, 由此降低了透水混凝土的抗压强度。聚丙烯纤维掺量为 7 kg/m^3 、长度为 16 mm 时透水混凝土抗压强度最佳, 达到 C20 等级。

2.3 抗折强度

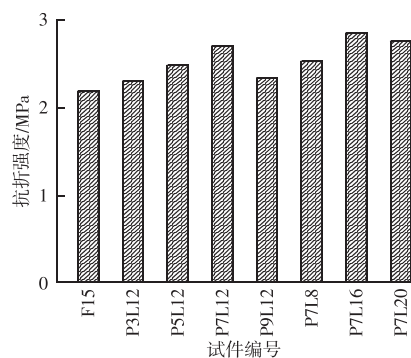
由图 3 (a) 可知, 随粉煤灰掺量增加, 7、28 d 抗折强度减小; 与未掺粉煤灰 F00 试件相比, 粉煤灰量为 5%、10%、15%、20% 的试件 7 d 抗折强度分别降低了 3.5%、6.2%、11.1%、17.7%, 28 d 抗折强度分别降低了 1.6%、3.5%、7.8%、13.6%。可见, 掺粉煤灰的透水混凝土抗折强度随养护龄期增长降幅逐渐减小, 抗折强度的变化规律与抗压强度略有不同, 这是由于透水混凝土的抗折强度主要由骨料之间水泥浆体的黏结强度决定, 而粉煤灰的填充效应可提高水泥浆体的密实程度, 但会削弱早期的基体强度, 由此导致 28 d 龄期抗折强度仍呈现为减小。90 d 龄期时抗折强度随粉煤灰掺量增加先增后减, 掺 15% 粉煤灰的试件抗折强度最大, 达到 2.85 MPa, 相比 F00 试件增长了 6.7%, 掺 20% 粉煤灰试件抗折强度低于 F00 试件 2.2%。这表明粉煤灰对提高透水混凝土的抗折强度同样具有一定效果, 但对抗折强度增长效果低于抗压强度。

由图 3 (b) 可知, 未掺聚丙烯纤维的 F15 试件 28 d 抗折强度为 2.19 MPa, 聚丙烯纤维长度为 12 mm, 纤维掺量为 3、5、7、9 kg/m^3 试件的抗折强度分别为 2.31、2.49、2.72、2.34 MPa, 相比于 F15 试件, 抗折强度分别增长了 5.5%、13.7%、24.2%、6.8%。可见, 抗折强度随聚丙烯纤维掺量增加先增后减, 纤维增强透水混凝土的抗折强度变化规律与抗压强度基本相近, 二者增强机理一致, 但聚丙烯纤维对抗折强度增强高于抗压强度, 这是由于水泥浆体开裂后纤维可以继续承担荷载, 桥接并阻止裂缝继续开展, 另外纤维可横跨基体内部大量不连续的孔隙, 增强内部结构的连续性, 故抗折强度增幅更为显著。透水混凝土的抗折强度同样随纤维长度增加先增大后减小, 纤维掺量为 7 kg/m^3 时, 纤维长度分别为 8、12、16、20 mm 的试件抗折

强分别为 2.53、2.72、2.85、2.76 MPa; 纤维长度为 16 mm 时抗折强度最大, 相比 8 mm 试件增长了 12.6%, 纤维长度为 20 mm 试件的抗折强度略高于长度为 12 mm 试件。长纤维可在裂缝集中区域横跨多个微裂缝而增强抗拉强度, 而短纤维在裂缝集中区域更易于被拔出, 故提高纤维长度对抗折强度的增强作用更佳。聚丙烯纤维掺量为 7 kg/m^3 、长度为 16 mm 时透水混凝土抗折强度最佳, 达到 C20 等级。



(a) 粉煤灰掺量



(b) 聚丙烯纤维掺量、长度

图 3 透水混凝土抗折强度演变规律

Fig. 3 Evolution of flexural strength in pervious concrete

2.4 耐磨性能

由图 4 可知, 基准组 F00 试件的磨坑长度为 28.6 mm; 随粉煤灰掺量增加, 磨坑长度呈先减小后增大趋势, 粉煤灰掺量为 15% 时磨坑长度最小, 为 24.3 mm, 较 F00 试件降低了 15.0%; 粉煤灰掺量为 5%、10%、20% 的试件磨坑长度分别为 27.1、25.8、26.9 mm, 较 F00 试件分别降低了 5.2%、9.8%、5.9%。适量掺入粉煤灰可改善水泥浆体的密实度, 粉煤灰微细颗粒填充水泥浆体内部孔隙, 优化骨料-浆体界面过渡区的微观结构, 增强表面抗磨损能力; 但粉煤灰掺量过高 (20%) 时, 早期水化产物减少

材料科学

导致表面强度降低,在磨轮反复碾压作用下骨料更易脱落,使耐磨性能有所下降。

未掺聚丙烯纤维的 F15 试件磨坑长度为 24.3 mm;随聚丙烯纤维掺量增加,磨坑长度先减小后增大,纤维掺量为 7 kg/m^3 时磨坑长度最小,为 22.1 mm,较 F15 试件降低了 9.1%;纤维掺量为 3、5、9 kg/m^3 的试件磨坑长度分别为 23.8、22.9、24.7 mm。聚丙烯纤维在混凝土基体中形成三维网络结构,有效抑制表面微裂缝的萌生与扩展,在磨轮碾压过程中纤维通过桥接作用阻止骨料过早脱落,显著提升表面完整性;但纤维掺量过高 (9 kg/m^3) 时,纤维分散性变差形成团聚体,反而成为表面薄弱点,削弱耐磨性能。随纤维长度增加,磨坑长度同样呈先减小后增大趋势,纤维长度为 16 mm 时磨坑长度最小 (21.8 mm),较 8 mm 纤维试件降低了 8.4%;纤维长度为 12、20 mm 的试件磨坑长度分别为 22.5、23.1 mm。适宜长度的纤维在基体中具有更佳的锚固效应,能更有效地跨越表面微裂缝并承受磨轮剪切力;纤维过短时锚固力不足易被拔出,过长时分散困难易形成应力集中点,均会劣化耐磨性能。

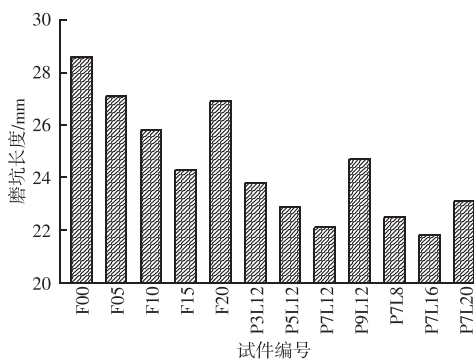


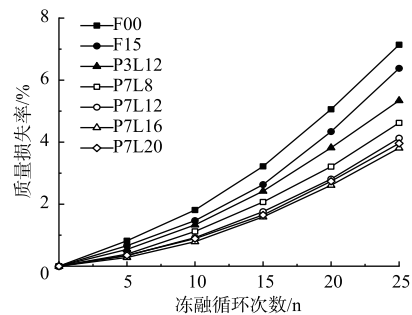
图 4 透水混凝土耐磨性能度演变规律

Fig. 4 The evolution law of the durability of pervious concrete

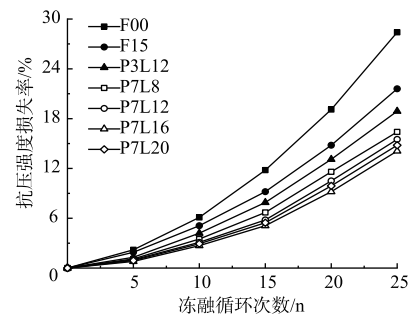
2.5 抗冻性能

选取 F00、F15、P3L12、P7L8、P7L12、P7L16、P7L20 试件进行 25 次冻融循环试验,对比粉煤灰、聚丙烯纤维掺量、长度对透水混凝土抗冻性能的影响。由图 5 可知, F00 试件在 25 次冻融循环后质量损失率和抗压强度损失率最大,分别为 7.1%、28.4%,均超出了“规程”中质量损失率最大 5%、抗压强度损失率最大 20%的限值要求。掺入 15% 粉

煤灰的透水混凝土抗冻性能较 F00 试件有所增强,25 次冻融循环后质量损失率为 6.4%,抗压强度损失率为 21.6%,仍超出了“规程”限值要求。掺入粉煤灰填充水泥浆内部孔隙,增强水泥浆体的强度,但透水混凝土中的连通孔隙在反复冻胀力作用下,削弱了骨料之间的黏结作用,使表面骨料逐渐脱落,从而导致抗压强度降低。



(a) 质量损失率



(b) 抗压强度损失率

图 5 聚丙烯纤维、粉煤灰对透水混凝土抗冻性能影响

Fig. 5 The impact of polypropylene fiber and fly ash on the frost resistance of pervious concrete

掺入聚丙烯纤维增强了水泥浆体在骨料之间的黏结力,纤维可抵抗反复冻胀力作用,纤维掺量为 3 kg/m^3 的试件在 25 次冻融循环后质量损失率为 5.3%,抗压强度损失率为 18.9%;可见低纤维掺量的试件质量损失率仍不满足规范要求,这因为低纤维掺量时增强效应不佳。

纤维掺量为 7 kg/m^3 时力学效果最佳,此时纤维长度为 8 mm 的试件在 25 次冻融循环后质量损失率为 4.8%,抗压强度损失率为 16.4%,这表明适宜的纤维掺量可显著增强透水混凝土的抗冻性能。随纤维长度增加,透水混凝土的抗冻性能增强,25 次冻融循环后,纤维长度为 12、16、20 mm 试件质量损失率分别为 4.6%、3.8%、4.0%,抗压强度损失率

分别为 15.5%、14.1%、14.8%，可见最佳纤维掺量时，不同纤维长度的试件抗冻性能均满足规范要求。合理的纤维掺量不仅能提高混凝土内部结构的连续性能，还能细化混凝土内部的孔隙，将大孔隙细化为多个小孔隙，由此可减小冻胀力效应；另外，增加纤维长度可使水泥浆体更好的胶结骨料，增强骨料之间的连接强度，可经受更高的冻胀力作用。

3 结论

通过不同粉煤灰、聚丙烯纤维掺量以及不同聚丙烯纤维长度时透水混凝土的透水性能、力学强度、耐磨性能以及抗冻性能试验，得出以下结论：

(1) 粉煤灰掺量 10% 时透水性能最佳；随聚丙烯纤维掺量增加，连通孔隙率减小，而透水系数先增加后减小，纤维掺量超过 7 kg/m^3 、长度超过 16 mm，透水性能下降最显著。

(2) 透水混凝土 90 d 抗压强度、抗折强度随粉煤灰掺量增加先增大后减小，掺量为 15% 效果最优，粉煤灰对透水混凝土抗折强度增强效果弱于抗压强度。

(3) 随聚丙烯纤维掺量增加抗压、抗折强度先增大后减小，纤维掺量为 7 kg/m^3 效果最优，抗压、抗折强度较未掺纤维试件分别增长了 19.4%、24.2%；抗压、抗折强度随纤维长度增加先增加后减小，纤维长度为 16 mm 时最佳，较纤维长度为 8 mm 试件分别增长了 9.7%、12.6%。

(4) 随粉煤灰、聚丙烯纤维掺量增加，磨坑长度先减小后增大，掺量分别为 15%、 7 kg/m^3 时耐磨性能最优；磨坑长度随纤维长度增加同样先减小后增大，纤维长度为 16 mm 时最小；掺 15% 粉煤灰和长度为 16 mm 的纤维 7 kg/m^3 ，磨坑长度较基准组降低 23.8%。

(5) 粉煤灰可提升透水混凝土的抗冻性能，但最佳掺量时仍不能满足规范要求；掺入聚丙烯纤维可增强透水混凝土抗循环冻胀力作用，低纤维掺量时效果有限，纤维掺量为 7 kg/m^3 时，抗冻性能随纤维

长度增加先增加后减小，长度为 16 mm 时最佳，质量损失率为 3.8%，抗压强度损失率为 14.1%。

参 考 文 献

- [1] 白小龙, 魏亚龙, 毕红卫, 等. 硅灰-矿渣粉改性多孔透水混凝土力学及抗冻性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (2): 35-41.
- [2] 代峻峰, 李合清, 崔永伟, 等. 海绵城市理论下透水再生骨料混凝土研究进展 [J]. 建筑结构, 2021, 51 (增刊 2): 988-994.
- [3] 刘音钰, 姜成, 刘杰, 等. 透水混凝土路面阻塞及其恢复研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2016, 39 (增刊 1): 159-163, 198.
- [4] 周玉玲, 明廷臻, 万美南. 透水混凝土强度及透水性能影响因素研究 [J]. 中国测试, 2021, 47 (10): 155-160.
- [5] 李子成, 张爱菊, 刘良军. 双掺粉煤灰和钢渣对透水混凝土强度的影响 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2015, 14 (1): 1-5.
- [6] 孙杰, 王厚安, 彭金龙, 等. 粉煤灰-硅灰透水再生混凝土冻融损伤研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (3): 7-12.
- [7] 高理想, 张海燕. 掺粉煤灰-玻璃粉透水混凝土物理及力学性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2026, 40 (3): 13-18, 25.
- [8] 何松松, 焦楚杰, 李松. 超细辅助胶凝材料对透水混凝土性能的影响 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (35): 14660-14667.
- [9] 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.
- [10] 辛志鹏, 朱亚光, 徐培葵, 等. 粉煤灰及聚丙烯纤维对再生透水混凝土性能的影响 [J]. 混凝土, 2023 (1): 73-77, 81.
- [11] 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.
- [12] 徐丽娜, 魏超, 丁旭, 等. 聚丙烯仿钢纤维-硅灰改性透水混凝土性能及微观结构 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (30): 13064-13074.
- [13] 单景松, 刘建, 王敏, 等. 聚丙烯纤维透水水泥混凝土受力性能研究 [J]. 中外公路, 2020, 40 (6): 276-280.
- [14] 林海威, 谢建斌, 吕龙, 等. 聚丙烯纤维改善透水混凝土抗拉性能机理研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2020 (3): 50-54.
- [15] 胡军安, 李耀威, 夏冬桃, 等. 聚合物改性纤维再生透水混凝土性能试验研究 [J]. 混凝土, 2025 (4): 263-269.