

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.11.005

多尺度聚丙烯纤维混凝土孔结构及抗冻性

梁宁慧, 胡 杨, 钟 杨, 刘新荣

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 选用 2 种尺寸聚丙烯细纤维与 1 种聚丙烯粗纤维, 进行单掺及混掺, 对 9 组不同纤维掺量试件进行快速冻融循环试验、抗压、劈裂试验及压汞试验, 研究不同冻融次数下混凝土质量、动弹性模量变化以及冻融循环前后混凝土拉、压强度变化; 研究多尺寸聚丙烯纤维对混凝土孔结构的改善情况; 研究多尺寸聚丙烯纤维混凝土孔结构与抗冻性的关系, 并对孔结构对混凝土抗冻性能的影响加以分析。试验结果表明: 将聚丙烯纤维掺入素混凝土后, 混凝土的微观孔结构和抗冻性能得到明显改善; 在相同掺量条件下, 聚丙烯粗纤维和多尺寸聚丙烯纤维对混凝土抗冻性有较大改善, 且多尺寸聚丙烯纤维对混凝土的抗冻性改善效果最好; 相比于素混凝土冻融后抗拉、压强度, 单掺聚丙烯细纤维混凝土强度损失分别降低了 9.95%~11.94% 和 4.29%~7.62%, 单掺聚丙烯粗纤维混凝土强度损失分别降低了 27.36% 和 16.67%, 混掺多尺寸聚丙烯纤维混凝土强度损失分别降低了 46.77%~53.23% 和 41.90%~50%。

关键词: 冻融循环; 力学性能; 多尺寸聚丙烯纤维; 孔结构; 抗冻性

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)11-038-09

Study on pore structure and frost resistance of multi-scale polypropylene fiber reinforced concrete

LIANG Ninghui, HU Yang, ZHONG Yang, LIU Xinrong

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: To study the frost resistance mechanism of multi-scale polypropylene fiber reinforced concrete (MPFC), crude polypropylene fibers in one size and fine polypropylene fibers in two sizes were selected to single-dope and mix-dope with concrete. The mass loss rate, the relative dynamic elastic modulus variation, and the tensile and compressive strength of the polypropylene fiber reinforced concrete before and after freeze-thaw cycle were analyzed based on the fast freeze-thaw cycle test and compression and splitting test. Mercury intrusion porosimetry (MIP) was carried out to study the relationship between frost durability degradation of cement concrete and pore structure. Besides, the influence of pore structure on the anti-frost performance is analyzed. The research indicates that adding polypropylene fiber into plain concrete can improve both the microstructure and the frost resistance of concrete. Under the condition of the same total fiber addition, crude polypropylene fiber and multi-scale polypropylene fiber can bring great improvement on frost resistance of concrete, and the effect of multi-scale polypropylene fiber on frost resistance of

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 重庆市研究生科研创新资助项目(CYS17040)。

Supported by Chongqing Graduate Research and Innovation on Project(CYS17040).

作者简介: 梁宁慧(1971—), 女, 副教授, 博士研究生, 主事从事边坡工程研究, (E-mail)466403454@qq.com。

concrete is the best. Compared with the common concrete after freeze-thaw cycle, the compression and tensile strength loss of single-dope of fine fiber are reduced by 9.95% to 11.94% and 4.29% to 7.62% respectively while the strength loss of single-dope crude fiber is reduced by 27.36% and 16.67% respectively, and that of MPFC decreases by 46.77% to 53.23% and 41.90% to 50% respectively.

Keywords: freeze-thaw cycle; mechanical property; multi-scale polypropylene fibers; micro-pore structure; frost resistance

在温度较低的寒冷地区,为了使构筑物的耐久性和强度仍满足使用标准,人们对混凝土抗冻性提出了更高的要求^[1]。经过大量的研究发现,在混凝土中掺入纤维可以在一定程度上改善寒冷地区公路路面、桥墩等的混凝土开裂情况,有效提高混凝土的抗冻性能及耐久性^[2-5]。

为了研究纤维对混凝土抗冻性能的影响,国内外学者进行了大量试验,研究纤维混凝土材料在冻融循环作用下的力学性能和损伤特性。蔡迎春等^[6]为了研究不同纤维掺量对混凝土在冻融循环作用下质量损失和相对动弹性模量的影响,进行了纤维混凝土快冻法试验,结果表明:聚丙烯纤维混凝土在冻融循环下的耐久性得到明显提高,并且和单掺纤维相比,混杂纤维的抗冻效果更好。刘卫东等^[7]基于宏观损伤力学方法,通过无损检测技术,进行了聚丙烯纤维混凝土冻融试验,并根据试验数据确立了冻融循环作用下冻融次数和聚丙烯纤维混凝土动弹性模量的关系。GE Xinmin 等^[8]研究了不同钢纤维掺量和含气量下混凝土的抗冻性能,结果表明,加入纤维后,能有效减小冻融损伤,提高混凝土的抗冻性能。实际上,孔结构作为混凝土微观结构的重要内容,对混凝土抗冻性和耐久性有直接影响^[9]。温家宝等^[10]进行了混凝土冻融循环试验,对混凝土孔结构、孔隙率、孔径分布等进行了对比分析。牛荻涛等^[11]对钢纤维混凝土孔径分布特征进行研究,发现混凝土掺加了钢纤维后,其孔隙率减小,提高了混凝土抗冻性能。

大量研究表明,混凝土内部孔结构对混凝土抗冻性能有重要影响^[12]。纵观纤维混凝土的抗冻性能研究现状,主要是基于混凝土宏观力学性能等方面,而从微观孔结构层面对混凝土抗冻性能的研究分析主要是对不掺加纤维的混凝土或单掺一种纤维的混凝土,而对多尺度聚丙烯纤维混凝土的基体微观孔结构以及孔结构与混凝土抗冻性的关系鲜有报道。基于笔者之前的研究^[13],试验选用 1 种聚丙烯粗纤维和 2 种尺寸的聚丙烯细纤维,在相同条件下进行单掺及混掺,然后进行快速冻融试验,在分析不同纤维掺量混凝土质量损失和动弹性模量随冻融循环次数变化规律以及冻融循环前后混凝土力学性能变化规律的基础上,进行压汞试验,研究多尺度聚丙烯纤维对混凝土基体微观孔结构的改善机理,分析多尺度聚丙烯纤维混凝土孔结构与抗冻性的关系,为其在实际工程中的抗冻设计和施工应用提供理论依据。

1 试验设计

1.1 材料及配合比

试验采用强度 42.5R 的水泥;采用粒径为 5~10 mm 及 10~20 mm 的碎石作为粗骨料;采用细度模数分别为 0.8 和 3.1 的特细砂和人工砂作为细骨料;采用聚羧酸高效减水剂作为减水剂;聚丙烯纤维性能指标如表 1 所示。混凝土配合比如表 2 所示,强度等级为 C30。粗、细聚丙烯纤维的掺量推荐最佳掺量,单掺聚丙烯细纤维的最佳掺量为 0.9 kg/m³,单掺聚丙烯粗纤维的最佳掺量为 6 kg/m³。

表 1 聚丙烯纤维物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical properties of polypropylene fiber

纤维 编号	直径/ mm	长度/ mm	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	断裂伸长率/ %	密度/ (g · cm ⁻³)	推荐掺量/ (kg · m ⁻³)
F1	0.026	19	641	4.5	40	0.91	0.9
F2	0.1	19	322	4.9	15	0.91	0.9
C1	0.8	50	706	7.4	10	0.95	6.0

表 2 C30 聚丙烯纤维混凝土配合比

Table 2 C30 polypropylene fiber reinforced concrete mix proportion

试件编号	纤维种类	水泥	砂	石	水	纤维掺量	砂率/%	减水剂/%
A0	无	380	701	1 144	175	0	38	1
A1	F1	380	701	1 144	175	0.9	38	1
A2	F2	380	701	1 144	175	0.9	38	1
A3	C1	380	701	1 144	175	6.0	38	1
A4	F1+C1	380	701	1 144	175	0.6+5.4	38	1
A5	F1+C1	380	701	1 144	175	0.9+5.1	38	1
A6	F1+C1	380	701	1 144	175	1.2+4.8	38	1
A7	F1+F2+C1	380	701	1 144	175	0.45+0.45+5.1	38	1
A8	F1+F2+C1	380	701	1 144	175	0.6+0.6+4.8	38	1

注:砂中人工砂与特细砂比例为 4:1;石中 5~10 mm 与 10~25 mm 石子比例为 4:6。

1.2 拌合工艺

聚丙烯纤维在混凝土中的分散性非常重要^[14-15]。试验采用先掺法,搅拌过程按以下步骤进行:首先,在搅拌筒内倒入砂和石子,启动搅拌机,同时将聚丙烯纤维均匀撒入搅拌筒内,搅拌约 2 min;随后,缓慢倒入水泥,继续搅拌约 2 min;最后,缓慢均匀倒入水,再搅拌约 2 min。整个搅拌完成后,测试混凝土坍落度以确认和易性满足施工要求。

1.3 设备及试验方法

试验设计制作了 9 组,每组 7 个 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件,用作未经冻融循环试件抗压强度、劈裂抗拉强度和压汞试验;并制备 9 组,每组 3 个 100 mm×100 mm×400 mm 棱柱体试件进行冻融循环试验。

标准养护 28 d 后,按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T50082—2009)中混凝土抗冻性能试验的“快冻法”进行冻融循环试验,设备采用 NJW-HDK-9 型微机全自动混凝土快速冻融试验系统,用感量为 0.5g 的中国凯丰集团 KF-H2 型电子秤和天津市建筑仪器厂 DT-10W 动弹仪分别测量记录各组试件在 0、25、50、75、100、125、150、175、200 次冻融循环下的质量和动弹性模量。试验结果如表 3 所示。

表 3 冻融循环试验结果

Table 3 Results of freeze-thaw cycle test

试件 编号	冻融循环次数									
	0	25	50	75	100	125	150	175	200	
A0	0.000 0	0.108 5	0.118 2	0.124 7	0.184 4	0.216 9	0.347 1	0.504 3	0.656 2	
A1	0.000 0	-0.016 9	0.056 3	0.061 9	0.073 2	0.112 6	0.180 2	0.382 9	0.534 9	
A2	0.000 0	0.011 1	0.044 5	0.055 6	0.089 0	0.133 5	0.278 1	0.361 5	0.489 4	
A3	0.000 0	0.132 2	0.154 2	0.176 2	0.242 3	0.258 8	0.385 5	0.567 2	0.732 4	
A4	0.000 0	-0.044 2	0.066 4	0.071 9	0.143 8	0.177 0	0.221 2	0.331 9	0.436 9	
A5	0.000 0	0.064 5	0.086 0	0.107 5	0.129 0	0.161 3	0.211 8	0.300 0	0.354 8	
A6	0.000 0	0.093 6	0.128 5	0.157 3	0.174 8	0.200 5	0.210 8	0.221 1	0.279 7	
A7	0.000 0	-0.036 3	0.010 4	0.062 3	0.110 1	0.148 5	0.202 5	0.258 6	0.306 3	
A8	0.000 0	0.062 9	0.094 3	0.104 8	0.089 0	0.095 3	0.106 9	0.130 9	0.152 9	

续表3

试件 编号	冻融循环次数								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
A0	0.000 0	3.336 9	4.439 2	5.168 7	5.460 3	6.586 5	7.708 0	10.245 5	13.552 2
A1	0.000 0	2.823 5	3.341 4	4.100 4	4.494 3	5.310 5	6.174 1	8.007 0	11.658 5
A2	0.000 0	2.693 3	3.698 4	4.466 9	4.902 4	5.357 3	6.549 4	8.878 4	12.117 2
A3	0.000 0	3.420 5	4.194 5	4.782 3	5.270 2	5.662 3	6.439 6	7.845 5	10.592 4
A4	0.000 0	2.546 5	3.318 5	3.883 3	4.021 5	4.818 9	5.450 2	7.103 4	9.429 2
A5	0.000 0	3.006 7	3.048 4	3.445 1	3.663 7	3.902 7	4.878 8	6.091 7	7.744 4
A6	0.000 0	2.109 4	2.697 0	3.269 8	3.475 4	4.209 3	4.399 5	5.098 6	6.723 6
A7	0.000 0	2.030 3	1.948 0	2.570 0	2.663 1	3.083 1	3.531 6	4.153 3	5.939 9
A8	0.000 0	1.698 8	2.107 4	2.128 0	2.443 1	2.800 4	2.822 8	3.385 1	4.281 7

将经过冻融循环后的每个棱柱体两端加工成 2 个边长为 100 mm 的标准立方体,并用游标卡尺测量其尺寸,依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002),采用 YAW-1000 型压力试验机测得未冻融以及冻融后的 9 组共 108 个试件的抗压和劈裂抗拉强度。

压汞试验是先将剩余的 1 组 100 mm×100 mm×100 mm 立方体试件用鄂式破碎机破碎成 2.5~5 mm 的颗粒,洗净并烘干至质量恒定,然后选取不含碎石的纯砂浆颗粒,采用美国 Micromeritics 公司生产的 AutoPore IV 9510 型全自动压汞仪进行孔结构测定。该设备的压力施加范围为 0.003~414 MPa,可测最小孔径为 3 nm。

2 试验结果分析

采用《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》(GB/T50082—2009)中混凝土抗冻性能试验的“快冻法”进行冻融试验。试验结果如表 3、图 1 和图 2 所示。

1)分析图 1、图 2 可以看出,冻融循环次数越多,试件的质量损失率和相对动弹性模量损失率也越大。

2)对比单掺细纤维的 A1、A2 试件与单掺粗纤维的 A3 试件,相比于素混凝土 A0 试件,A1、A2 试件的质量损失率得到了降低,但 A3 试件的质量损失率却不降反增,说明单掺粗纤维对混凝土质量损失率不能起到正向的增强作用。

3)图 1 为不同纤维掺量聚丙烯纤维混凝土在不同冻融次数下的质量损失率变化曲线图。根据数据结果可知:经过 200 次冻融循环作用后,质量损失率最大的试件达到了 0.732 4%,为单掺粗纤维的 A3 试件;质量损失率第二高的素混凝土 A0 试件的质量损失率为 0.656 2%;A4~A8 试件的质量损失率均小于 A0~A3 试件,这表明混掺 2 种或 3 种纤维,能够降低试件的质量损失率,特别是混掺多尺寸聚丙烯纤维的混凝土试件 A8,质量损失率最低,仅为 0.152 9%,这说明 3 种尺寸聚丙烯纤维混掺可以提高冻融循环后混凝土的完整性。

4)图 2 为随着冻融次数增加不同纤维掺量混凝土相对动弹性模量损失率变化的曲线图。分析图 2 可知:9 组试件的相对动弹性模量损失率随着冻融循环次数的增加而增加,在前 25 次冻融循环中,试件的相对动弹性模量变化速率较快,之后有所减慢;在 100 次冻融循环后变化速率再一次增加。在掺入了聚丙烯纤维的 8 组试件中,混掺纤维试件 A4~A8 的相对动弹性模量损失相对于单掺纤维试件 A1~A3 有了明显降低;对比分析混掺纤维的 A4~A8 试件,相对于混掺 2 种纤维的 A4~A6 试件,多尺度聚丙烯纤维混凝土试件 A7 和 A8 的相对动弹性模量损失得到了明显抑制,且变化速率也更慢,说明多尺度聚丙烯纤维混凝土具有更好的抗冻性;与聚丙烯纤维混凝土相比,素混凝土 A0 的相对动弹性模量损失速率上升最快,损失也最大,表明纤维的掺入有效地延缓了混凝土内部微裂缝的发展,抑制了冻融对混凝土产生的损伤。整体来看,多尺寸聚丙烯纤维混凝土的抗冻性能最强,混掺 2 种聚丙烯纤维混凝土次之,但其抗冻性能优于单掺聚丙烯纤维混

凝土,素混凝土的抗冻性能最弱;对于混掺纤维混凝土,提升细纤维的比例,混凝土的抗冻性能会得到提升,这是由于不同尺寸纤维能更好地协调发挥捆绑与桥接作用,改善混凝土基体孔结构。

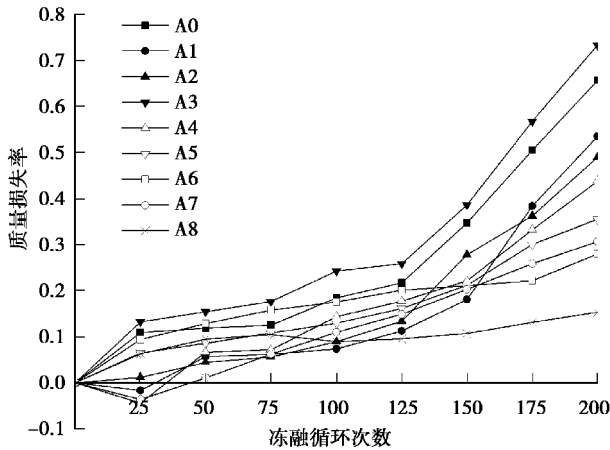


图 1 冻融循环过程中质量损失率的变化规律

Fig. 1 Variation curves of the mass loss rate during freeze-thaw cycles

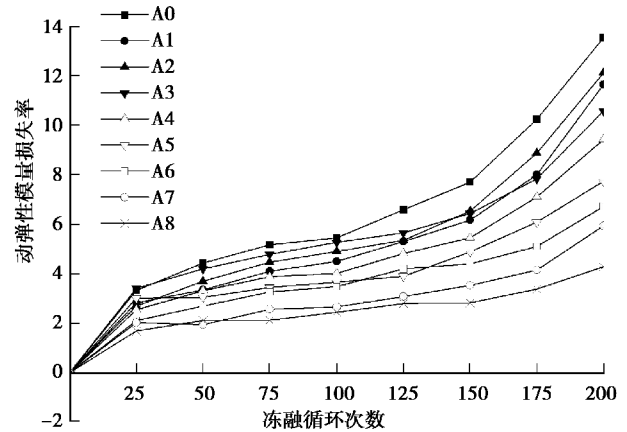


图 2 冻融循环过程中相对动弹性模量损失率的变化规律

Fig. 2 Variation curves of the relative dynamic elastic modulus loss rate during freeze-thaw cycles

2.1 未冻融混凝土抗压及劈裂抗拉强度

试验采用 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 非标准试件,测得的抗压强度值均应乘以尺寸换算系数 0.95,劈裂强度值需乘以尺寸换算系数 0.85。冻融前的混凝土抗压和劈裂抗拉强度,如图 3 和图 4 所示。

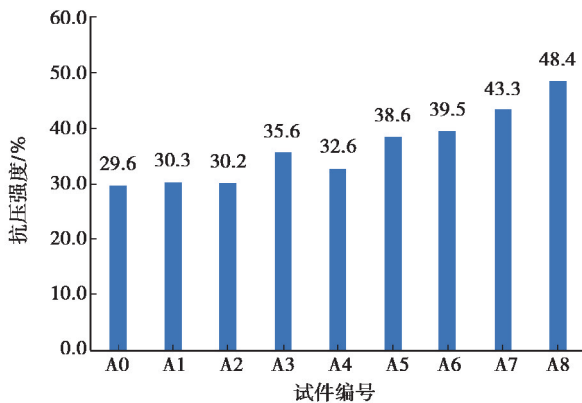


图 3 冻融前混凝土抗压强度

Fig. 3 Concrete compressive strength before freeze-thaw cycle

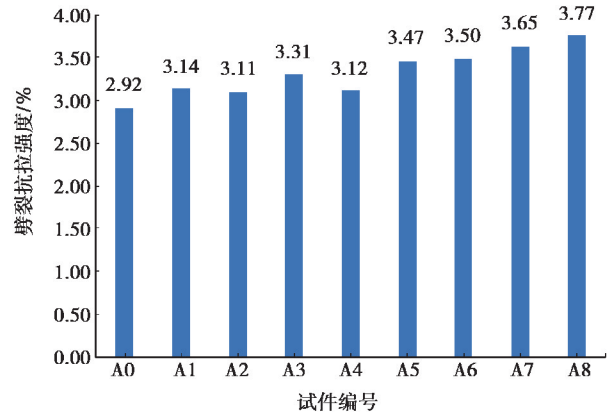


图 4 冻融前混凝土劈裂抗拉强度

Fig. 4 Concrete splitting tensile strength before freeze-thaw cycle

分析图 3、图 4 可知:1)聚丙烯纤维的加入对混凝土的抗压和劈裂抗拉强度均有所提高,与素混凝土相比,抗压强度提高了 2%~63.5%,抗拉强度提高了 6.5%~29.1%;2)单掺聚丙烯粗纤维对混凝土抗压和劈裂抗拉强度提高明显,但单掺聚丙烯细纤维对其提升效果不明显;3)分析混掺 2 种聚丙烯纤维的 A4~A6 混凝土试件,可以发现,在纤维总掺量相同的情况下,提升细纤维的掺量,混凝土的抗压和劈裂抗拉强度提高越大。与 A4 相比,A5 的抗压和抗拉强度分别提高了 18.4%和 11.2%;A6 的抗压强度提高 21.2%,抗拉强度提高 12.2%;4)分析 A7、A8 试件,可以看出,A8 试件的抗压和劈裂抗拉强度分别比 A7 试件提高了 11.7%和 3.3%,即纤维总掺量一定时,混掺纤维中的细纤维占比越大,混凝土试件的抗压和劈裂抗拉强度提升越大;5)A5 和 A7 以及 A6 和 A8 的纤维总掺量及粗、细纤维比例均相同,对比试验结果可知,与 A5 试件相比,A7 的抗压强度和抗拉强度分别提高了 12.2%和 5.2%;与 A6 相比,A8 的抗压强度提高了 22.5%,抗拉强度提高了 6.3%。综上所述:多尺度聚丙烯纤维对混凝土抗压和劈裂抗拉性能的提升效果最显著;在纤维总掺量保持不变的情况下,适当提升细纤维比例,可提升多尺度聚丙烯纤维对混凝土性能的增强效果。

2.2 冻融后混凝土抗压及劈裂抗拉强度

图 5 和图 6 分别为冻融后各试件抗压强度和劈裂抗拉强度损失率的柱形图。由这 2 幅图可知:将单掺聚丙烯纤维混凝土试件 A1 和 A2 与素混凝土相比,可以看到,A1 和 A2 的抗压和劈裂抗拉强度损失率的降低并不明显。比较分析纤维总掺量相同的混掺试件 A4~A8,掺加 3 种不同尺寸的多尺度聚丙烯纤维混凝土试件 A7、A8 的强度损失率比混掺 2 种纤维的 A4~A6 试件更低。对比分析粗、细纤维掺量分别相同的 A5、A7 以及 A6、A8 试件,多尺寸聚丙烯纤维混凝土 A7 的抗压和劈裂抗拉强度损失率分别为 12.2% 和 10.7%,远低于 A5 的 17.3% 和 13.2%;多尺寸聚丙烯纤维混凝土 A8 的抗压和劈裂抗拉强度损失率为 10.5% 和 9.4%,远低于 A6 的 16.8% 和 12.8%。而比较分析 A7 和 A8 2 种多尺度聚丙烯纤维混凝土,可以发现细纤维占比较多的 A8 试件的抗压劈裂强度和抗拉强度损失率相比于 A7 试件都更低,即多尺度聚丙烯纤维混凝土试件 A8 的抗冻性最好。

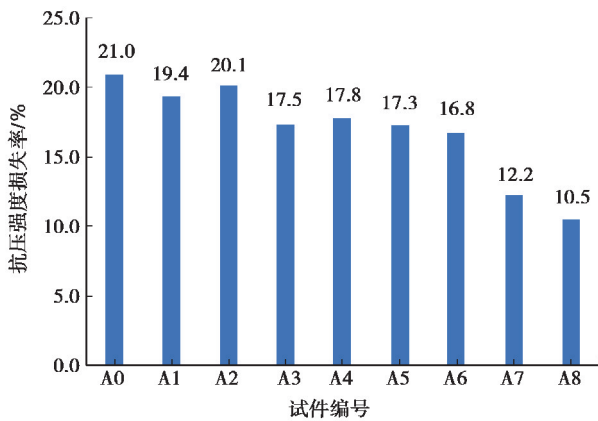


图 5 冻融后混凝土抗压强度损失率

Fig. 5 Loss rate of concrete compressive strength

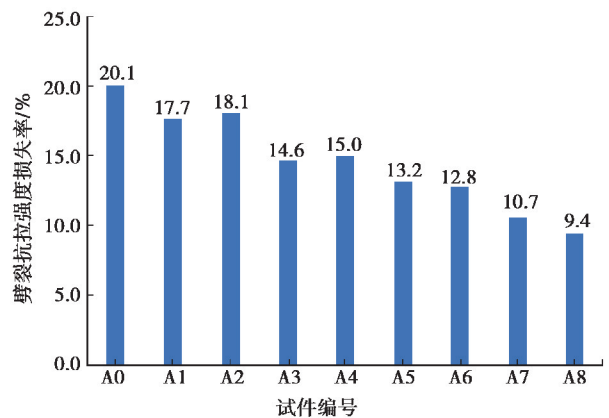


图 6 冻融后混凝土劈裂抗拉强度损失率

Fig. 6 Loss rate of concrete splitting tensile strength

2.3 微观孔结构

根据试验结果可知,在 8 组试件当中,多尺度聚丙烯纤维混凝土 A8 试件的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗冻性能均最优,因此,笔者选取 A8 试件,粗、细纤维掺量均与 A8 相同的 A6 试件,总纤维掺量与 A8 相同的单掺粗纤维试件 A3 和素混凝土砂浆微观孔结构特征与混凝土宏观抗冻性能的关系。

压汞测孔仪的基本工作原理是在给定的外界压力条件下,将一种非浸润且不与样品发生化学反应的液体(通常选用汞)压入多孔固体。根据毛细管现象可知:

$$p = -\frac{2\sigma \cos \alpha}{r}$$

式中: p 为将汞压入半径为 r 的孔隙中所需的压力值,MPa; r 为孔隙半径,nm; σ 为汞的表面张力,取 $\sigma = 49.44$ N/cm; α 为汞与材料的润湿接触角,对混凝土取 $\alpha = 130^\circ$ 。

通过测量孔压力,可以求得该压力值下汞进入的最小孔孔径以及该等级孔隙体积。由于混凝土基体中孔隙的连通性,内部大孔必须通过表面的小孔才能与外界进行物质交换,而要使汞进入内部大孔就必须施加足够的压力通过表面的小孔。描述这一孔结构形态特征的参数是临界孔径,反映了混凝土基体孔隙的连通性和曲折性。从图 7 混凝土水泥石累计压入汞量与孔径关系曲线图得到临界孔径,即压入汞量开始急剧增加时对应的孔径。素混凝土 A0 的临界孔径最大,表明其孔隙连通性好;A3、A6 和 A8 的临界孔径比 A0 分别减小了 25.22、50.28、46.08 nm,说明聚丙烯纤维的掺入可以降低孔隙的连通性,而且粗细纤维混掺的降低效果更好。

根据文献[16]将混凝土砂浆中的孔分为 4 类:凝胶孔(<10 nm),过渡孔(10~100 nm),毛细孔(100~1 000 nm),大孔(>1 000 nm)。图 8 为混凝土水泥石砂浆孔径分布微分曲线图,表 4 为混凝土水泥石孔径分布特征数据结果。结合图 8 和表 2 可看出:A0 和 A3 的孔隙率分别为 13.11% 和 12.79%,二者相差不大,但 A6 和 A8 的孔隙率分别比 A0 增加了 2.02% 和 3.33%。并且,A0 的最可几孔径为 62.88 nm,小于 100 nm

的细孔占 65.82%，与 A0 相比，A3、A6 和 A8 的最可几孔径分别降低了 24.20、48.25、44.22 nm，细孔比率分别提高了 11.96%、26.66% 和 23.81%，这说明聚丙烯纤维的掺入使混凝土孔结构在一定程度上得到了细化，而且，细聚丙烯纤维可在略微提高混凝土孔隙率的同时，增加胶凝孔和过渡孔所占比例，减少毛细孔含量，减小最可几孔径，降低了孔隙的连通性，混凝土砂浆孔结构得到明显改善，显著地提高了混凝土的抗冻性能。

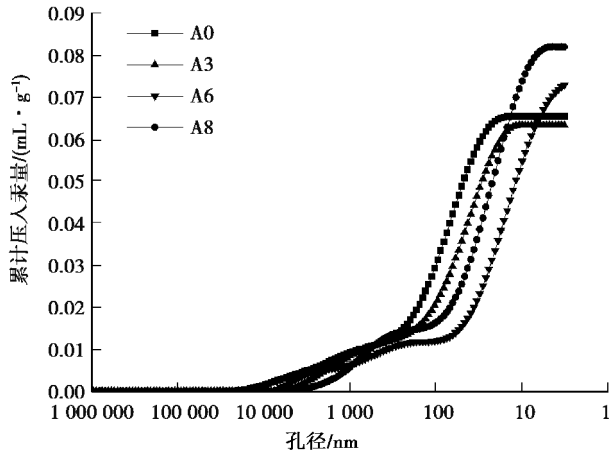


图 7 混凝土水泥石累计压入汞量与孔径关系曲线

Fig. 7 Relation curve of cumulative mercury and pore radius

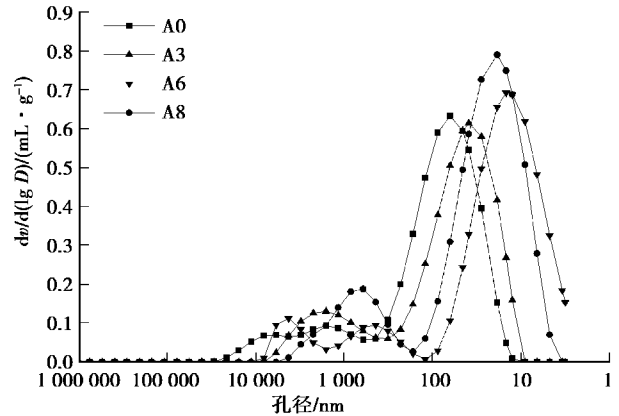


图 8 混凝土水泥石孔径分布微分曲线

Fig. 8 Differential curve of pore radius distribution

表 4 混凝土水泥石孔径分布特征

Table 4 Pore radius distribution of concrete cement

试件编号	孔隙率/ %	孔隙体积/ (mL · g ⁻¹)	临界孔径/ nm	最可几孔径/nm	孔径分布/%			
					<10 nm	10~ 100 nm	100~ 1 000 nm	>1 000 nm
A0	13.11	0.0654	65.53	62.88	0.00	56.82	29.81	13.37
A3	12.79	0.0633	40.31	38.68	0.07	68.71	18.89	12.34
A6	15.13	0.0747	15.25	14.63	29.00	54.48	8.21	8.31
A8	16.55	0.0819	19.45	18.66	13.51	67.12	13.52	5.85

3 机理分析

研究表明，混凝土的冻融破坏主要受饱水度、孔结构以及含气量的影响。根据静水压力理论以及渗透假说，混凝土的冻融破坏主要是由于水渗入混凝土内部微裂缝、毛细孔道等，在冻融条件下，水分不断的出现冻结、融化，混凝土基体内部结构会遭到孔隙水冻融而产生的膨胀力和渗透压力的破坏，宏观表现出来即为混凝土的动弹性模量下降、冻融后强度降低等。

基于笔者有关多尺寸聚丙烯纤维混凝土抗裂性能的研究，在混凝土中加入多尺寸聚丙烯纤维后，不同尺寸的纤维在水泥基体中形成了空间网络结构，起到了“承托”骨料的作用，细纤维有效的抑制混凝土微裂缝的产生与延展，而粗纤维能有效抑制宏观裂纹的产生。混掺后能在混凝土凝结硬化协同作用下，有效抑制混凝土硬化阶段裂缝的形成和发展，有效抑制因冻胀压力和渗透压力产生的微裂纹，降低损伤程度，提升其抗渗、抗冻性能。

在混凝土中掺入纤维后，纤维会在一定程度上阻碍混凝土搅拌和成型过程中基体内空气的溢出，细化内部大孔隙，增大胶凝孔和过渡孔比例，从而使得混凝土孔结构更趋于优化。产生的无数微小且不连通的气泡将提升混凝土的含气量，降低孔隙中的饱水程度；同时，由于混凝土内部闭合气泡的存在，可以缓解混凝土在冻融过程中因孔隙水结冰而产生的冻胀压力和渗透压力，减少对基体的破坏。

试验发现,在纤维总掺量相同的条件下,在一定范围内,提升细纤维比例可以有效提升混凝土力学性能和抗冻性能,这是由于相同质量下,细纤维的根数增加可以改善基体初始缺陷,提升含气量。而在细纤维和粗纤维掺量均相同的条件下,细纤维为 2 种时,其各项性能均优于细纤维为 1 种时的情况,即多尺寸聚丙烯纤维混凝土优于混掺 2 种纤维混凝土,这是由于多尺寸聚丙烯纤维级配更好,不同尺寸的纤维能分别作用于不同尺寸的裂缝,从而有效抑制微裂纹的产生和发展,降低了损伤程度。由此可见,通过向混凝土基体中混掺多尺寸聚丙烯纤维,减少了混凝土基体初始缺陷、提高了基体含气量,优化了基体微观孔结构,显著提高了混凝土的抗冻性。

而在纤维混凝土进行抗压、劈裂试验时,由于在其受力过程中多尺寸聚丙烯纤维能与混凝土共同变形,协同作用,并且不同尺寸的纤维能在混凝土裂缝发展的不同阶段发挥阻裂作用,形成三维乱向空间支撑体系使得混凝土裂而不坏,故能保持混凝土试件整体性,产生“箍筋效应”。在产生裂缝后,细纤维与粗纤维能在不同阶段分别受力,提高其抗压、劈裂抗拉能力。

4 结 论

通过对不同聚丙烯纤维掺量的混凝土试件进行冻融循环试验,研究它们的质量、动弹性模量变化以及抗压强度变化等,比较不同掺量聚丙烯纤维对混凝土孔结构影响,并对孔结构与混凝土抗冻性能的关系加以分析,得到以下结论:

1) 在相同掺量条件下,多尺寸聚丙烯纤维对混凝土的抗冻性改善效果最好。这是由于混掺多尺寸聚丙烯纤维级配更好,且不同尺寸的纤维能分别作用于不同尺寸的裂缝,优化了基体微观孔结构,提高了混凝土的抗冻性。

2) 在纤维总掺量相同条件下,多尺寸聚丙烯纤维混凝土中细纤维所占比例由 15% 提高到 20% 时,混凝土冻融后抗压、抗拉劈裂强度损失率分别降低了 13.93% 和 12.15%。即在一定范围内,增加细纤维掺入比例可以改善基体微观孔结构,提高混凝土抗冻耐久性。

3) 聚丙烯纤维在混凝土基体中主要起到改善优化孔结构和阻裂增韧的作用。对于多尺度聚丙烯纤维混凝土,3 种不同尺寸的纤维混掺能互相支撑,形成三维乱向空间网架结构,提升混凝土基体的整体性,在改善混凝土内部孔结构的同时,起到显著的阻裂增韧效果,进一步提高混凝土抗冻性能。

参考文献:

- [1] Rosenqvist M, Oxfall M, Fridh K, et al. A test method to assess the frost resistance of concrete at the waterline of hydraulic structures[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(8): 2403-2415.
- [2] 马晓良,董新平.寒冷及严寒地区隧道冻害发生机理及防治[J].*地下空间与工程学报*, 2014, 10(S2): 1996-1999.
MA Xiaoliang, DONG Xinping. The frost damage mechanism and countermeasures for tunnels in cold regions[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(S2): 1996-1999.(in Chinese)
- [3] Laustsen S, Hasholt M T, Jensen O M. Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(1/2): 357-368.
- [4] 王成,葛广华,侯建国,等.南疆地区混凝土结构耐久性现状与影响因素研究[J].*武汉大学学报(工学版)*, 2017, 50(3): 447-453.
WANG Cheng, GE Guanghua, HOU Jianguo, et al. Study of durability of concrete structures and its influencing factors in south region of Xinjiang[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2017, 50(3): 447-453.(in Chinese)
- [5] 郭寅川,申爱琴,何天钦,等.疲劳荷载与冻融循环耦合作用下季冻区路面水泥混凝土孔结构研究[J].*中国公路学报*, 2016, 29(8): 29-35.
GUO Yinchuan, SHEN Aiqin, HE Tianqin, et al. Pore structure research on pavement cement concrete subjected to coupling effect of fatigue load and cyclic freeze-thaw in seasonally frozen ground region[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(8): 29-35.(in Chinese)
- [6] 蔡迎春,代兵权.改性聚丙烯纤维混凝土抗冻性能试验研究[J].*混凝土*, 2010(7): 63-64, 75.
CAI Yingchun, DAI Bingquan. Experimental research on frost resistance performance of modified polypropylene fiber

- concrete[J]. Concrete, 2010(7): 63-64, 75.(in Chinese)
- [7] 刘卫东, 苏文梯, 王依民. 冻融循环作用下纤维混凝土的损伤模型研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 124-128.
LIU Weidong, SU Wenti, WANG Yimin. Research on damage model of fibre concrete under action of freeze-thaw cycle [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(1): 124-128.(in Chinese)
- [8] Ge X M, Chen H, Fan Y R, et al. An improved pulse sequence and inversion algorithm of T2 spectrum[J]. Computer Physics Communications, 2017, 212: 82-89.
- [9] 张士萍, 邓敏, 吴建华, 等. 孔结构对混凝土抗冻性的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(6): 56-59.
ZHANG Shiping, DENG Min, WU Jianhua, et al. Effect of pore structure on the frost resistance of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(6): 56-59.(in Chinese)
- [10] 温家宝. 基于孔结构分析的混凝土冻融损伤研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
WEN Jiabao. Research on freeze-thaw damage of concrete based on hole structure analysis [D]. Harbin: Harbin engineering university, 2013.(in Chinese)
- [11] 牛荻涛, 姜磊, 白敏. 钢纤维混凝土抗冻性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012(4): 80-84, 98.
NIU Ditao, JIANG Lei, BAI Min. Experimental analysis on the frost resistance of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2012(4): 80-84, 98.(in Chinese)
- [12] 廉慧珍. 建筑材料物相研究基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
LIAN Huizhen. Research foundation of physical phase of building materials [M]. Beijing: Tsinghua university press, 1996. (in Chinese)
- [13] 梁宁慧. 多尺度聚丙烯纤维混凝土力学性能试验和拉压损伤本构模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
LIANG Ninghui. The mechanics performance test of multi-scale polypropylene fiber concrete and the study of tension and compression damage constitutive model [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.(in Chinese)
- [14] Mlynárik V. Introduction to nuclear magnetic resonance[J]. Analytical Biochemistry, 2017, 529: 4-9.
- [15] Cheng Y, L Z G, Huang X, et al. Effect of Friedel's salt on strength enhancement of stabilized chloride saline soil [J]. Journal of Central South University, 2017, 24(4): 937-946.
- [16] 郭剑飞. 混凝土孔结构与强度关系理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
GUO Jianfei. The theoretical research of the pore structure and strength of concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)