

文章编号:1671-1637(2016)04-0037-08

冻融循环作用下聚丙烯纤维混凝土的力学性能

严武建^{1,2,3}, 牛富俊^{1,2,4}, 吴志坚³, 牛富航¹, 林战举¹, 宁作君⁵

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国地震局兰州地震研究所 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 4. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 5. 甘肃土木工程科学研究院, 甘肃 兰州 730020)

摘要:通过4组不同配合比聚丙烯纤维混凝土的快速冻融循环试验,测得了不同冻融循环次数后混凝土的抗压强度、纵波波速与动弹性模量,研究了冻融循环作用下不同配合比聚丙烯纤维混凝土的力学性能与损伤量特征,分析了材料性质、材料配合比与冻融循环次数对力学性能的影响。分析结果表明:冻融循环200次后,未掺加引气剂的C30聚丙烯纤维混凝土、掺加引气剂的C30聚丙烯纤维混凝土、未掺加引气剂的C40聚丙烯纤维混凝土、掺加引气剂的C40聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率分别为46.53%、49.05%、34.56%、37.64%;冻融循环300次后,4组聚丙烯纤维混凝土纵波波速分别降低了8.42%、6.48%、16.72%、11.68%,动弹性模量分别降低了46.54%、35.72%、54.41%、53.72%;冻融循环150次后,C30和C40聚丙烯纤维混凝土损伤量迅速增长,且C40聚丙烯纤维混凝土损伤量高于C30聚丙烯纤维混凝土;在相同的冻融次数下,未掺加引气剂的C40聚丙烯纤维混凝土的损伤量最大;抗冻性能的改善效果从大到小依次为掺加引气剂C30聚丙烯纤维混凝土、未掺加引气剂C30聚丙烯纤维混凝土、掺加引气剂C40聚丙烯纤维混凝土、未掺加引气剂C40聚丙烯纤维混凝土。

关键词:路面材料;聚丙烯纤维混凝土;冻融循环;抗压强度;纵波波速;损伤量

中图分类号:U416.16

文献标志码:A

Mechanical property of polypropylene fiber reinforced concrete under freezing-thawing cycle effect

YAN Wu-jian^{1,2,3}, NIU Fu-jun^{1,2,4}, WU Zhi-jian³, NIU Fu-hang¹, LIN Zhan-ju¹, NING Zuo-jun⁵

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Administration, Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, Gansu, China; 4. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China; 5. Gansu Science Research Institute of Civil Engineering, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: Through fast freezing-thawing cycle test on four groups of polypropylene fiber reinforced concretes with different mix proportions, the compressive strength, longitudinal wave velocity and dynamic elastic modulus of concrete after different times of freezing-thawing cycles

收稿日期:2016-04-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41472297);国家科技支撑计划项目(2014BAG05B05);中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项项目(2014IESLZ01)

作者简介:严武建(1980-),男,江西鹰潭人,中国地震局兰州地震研究所副研究员,中国科学院西北生态环境资源研究院工学博士研究生,从事岩土地震工程与混凝土耐久性研究。

导师简介:牛富俊(1970-),男,甘肃会宁人,中国科学院西北生态环境资源研究院研究员,工学博士。

were obtained, the mechanical property and damage amount characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete under freezing-thawing cycle effect were studied, and the effects of material property, material mix proportion and times of freezing-thawing cycles on the mechanical property were analyzed. Analysis result shows that after 200 times of freezing-thawing cycles, the compressive strength loss rates of C30 polypropylene fiber reinforced concrete without air entraining agent, C30 polypropylene fiber reinforced concrete with air entraining agent, C40 polypropylene fiber reinforced concrete without air entraining agent and C40 polypropylene fiber reinforced concrete with air entraining agent are 46.53%, 49.05%, 34.56% and 37.64% respectively. After 300 times of freezing-thawing cycles, the longitudinal wave velocities of four groups of polypropylene fiber reinforced concretes decrease by 8.42%, 6.48%, 16.72% and 11.68% respectively, and the dynamic elastic moduli decrease by 46.54%, 35.72%, 54.41% and 53.72% respectively. After 150 times of freezing-thawing cycles, the damage amounts of C30 and C40 polypropylene fiber reinforced concrete increase rapidly, and the damage amount of C40 polypropylene fiber reinforced concrete is bigger than that of C30 polypropylene fiber reinforced concrete. Under the same times of freezing-thawing cycles, the damage amount of C40 polypropylene fiber reinforced concrete without air entraining agent is biggest. The improving effects on frost resistance property from big to small are C30 polypropylene fiber reinforced concrete with air entraining agent, C30 polypropylene fiber reinforced concrete without air entraining agent, C40 polypropylene fiber reinforced concrete with air entraining agent, C40 polypropylene fiber reinforced concrete without air entraining agent. 6 tabs, 7 figs, 28 refs.

Key words: pavement material; polypropylene fiber reinforced concrete; freezing-thawing cycle; compressive strength; longitudinal wave velocity; damage amount

Author resumes: YAN Wu-jian(1980-), male, associate researcher, doctoral student, +86-931-4617275, yanwj1980@126.com; NIU Fu-jun(1970-), male, researcher, PhD, +86-931-4967263, niufujun@lzb.ac.cn.

0 引 言

耐久性是在严寒环境中的一个关键指标^[1-3],混凝土在低温情况下冻融循环的耐久性尤其重要^[4-6]。在中国,由于地域辽阔,很多建筑物特别是东北、华北等地的水工建筑物存在严重的冻融破坏问题,冻融循环加剧了混凝土内部初始裂缝的扩展并且诱发新裂缝的出现和发展^[7]。提高混凝土结构的适用性和抗冻性主要通过延缓混凝土内部微观裂缝的发展、阻滞宏观裂缝的发生与发展来实现,以此提高混凝土的抗拉强度和抗变形能力。在水泥基体中掺入纤维是强化与韧化混凝土、提高阻裂能力的有效途径^[8]。

目前,国内外许多学者研究了冻融循环作用下纤维混凝土的力学特性及损伤特征。陈柳灼等研究了C40普通混凝土掺入钢纤维和聚丙烯纤维在冻融循环后的质量损失、抗拉强度、抗压强度、基振频率与动弹性模量,结果表明纤维的加入能抑制冻融对混凝土的损伤作用,且聚丙烯纤维的抑制作用大

于钢纤维^[9];刘卫东等根据细观损伤力学和数学模拟的方法建立了纤维混凝土冻融损伤本构模型^[10];李燕等对不同纤维掺量轻骨料混凝土冻融循环后的力学性能及损伤量进行研究,得到了不同纤维轻骨料混凝土的抗压强度与冻融循环次数的关系、冻融后的损伤度及损伤增量^[11];Çavdar对冻融循环作用下纤维钢筋混凝土砂浆的力学特性进行了研究^[12];Shang等研究了冻融循环后加气混凝土在压缩空气作用下的行为^[13];江凯等研究了早强型含水不饱和聚氨酯混凝土的力学性能^[14];Shang等研究了冻融循环后在三轴压缩作用下普通混凝土的强度与变形特征^[15];肖前慧进行了冻融环境多因素耦合作用下混凝土结构的耐久性研究^[16];黄星等用超声波方法研究了冻结粉质黏土、冻结重塑黄土的声学特性与物理力学特性^[17-18];王大雁等用超声波方法研究了冻结砂土、冻结黄土和冻结黏土的声学特性与物理力学特性^[19-21];邴慧等用超声波方法研究了含盐冻结粉质黏土的声学特性与物理力学特性^[22-23];She等用超声波方法研究了泡沫混凝土的设定行为^[24]。

冻融循环作用下混凝土力学性能的研究有不少成果,但对于聚丙烯纤维混凝土力学性能的研究未见有大量报道,因此,本文对 4 组不同配合比的聚丙烯纤维混凝土进行快速冻融循环试验,利用压力机、超声法和共振法测得不同冻融循环后混凝土的抗压强度、纵波波速与动弹性模量,进而得到冻融循环作用下不同配合比聚丙烯纤维混凝土的力学特性与损伤规律。

1 试验设计

1.1 主要材料与混凝土的配合比

混凝土的设计强度等级为 C30 和 C40,水泥为祁连山水泥厂生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,

细骨料为洮河天然河沙,含泥量小于 0.2%,粗骨料为石灰岩质锤破碎石,粒径为 5~20 mm,外加剂为聚羧酸高效减水剂,纤维为甘肃某公司生产的聚丙烯纤维,引气剂为十二烷基苯磺酸钠,水为兰州市民用自来水。聚丙烯纤维的性能参数见表 1,a、b、c、d 等 4 组混凝土配合比的设计参数见表 2。

表 1 聚丙烯纤维的性能参数
Tab. 1 Performance parameters of polypropylene fiber

直径/ μm	100
长度/mm	12
抗拉强度/MPa	400
弹性模量/GPa	>8
密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.91

表 2 混凝土配合比设计参数
Tab. 2 Design parameters of concrete mix proportions

编号	强度等级	水泥/kg	砂子/kg	石子/kg	水/kg	减水剂/kg	纤维/kg	引气剂/g	水胶比
a	C30	390	820.69	1 045	156	3.9	0.600	0.0	0.4
b	C30	390	820.69	1 045	156	3.9	0.600	31.2	0.4
c	C40	440	784.96	999	176	4.4	0.677	0.0	0.4
d	C40	440	784.96	999	176	4.4	0.677	35.2	0.4

1.2 冻融方法与过程

按《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)的快冻法进行试件的冻融循环试验。在混凝土中掺入相同体积掺量的聚丙烯纤维来制作成型尺寸分别为 10 cm×10 cm×40 cm 的棱柱体试件和 10 cm×10 cm×10 cm 的立方体试件。冻融循环试验按强度等级和引气剂含量的不同分为 4 组,每组中分别用 3 个棱柱体试件、21 个立方体试件。在冻融试验前将混凝土在水中自然养护 28 d,冻融过程中均处于饱和水状态,温度控制在 $-17\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,每次冻融循环在 2.5~4.0 h 内完成,冻融转换时间不超过 10 min,融化时间不少于 1/4 个冻融周期,受试件浸入水中时其截面四周均受到边界条件相同的冻融作用。

冻融循环 50、100、150、200 次后取出试件,测试混凝土的抗压强度、纵波波速与动弹性模量并称量质量,其中一部分试件继续进行到 250、300 次冻融循环,冻融后取出试件测试其纵波波速和动弹性模量。

1.3 试验设备与试验过程

试验设备包括 Matest 混凝土压力机、NJDR-9 型微机全自动混凝土快速冻融试验机、DT-16 型混凝土动弹模量测定仪与 RSM-SY5(T)型非金属声波检测仪。

每次冻融后取出混凝土测试其抗压强度、纵波

波速与动弹性模量,并称量质量,测试时每组分别取 3 个棱柱体试件和 3 个立方体试件,并取其平均值。

2 试验结果分析

2.1 抗压强度

按照前述试验方法,每经历 50 次冻融循环后取出混凝土试件晾干,按照《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T 17671—1999)测试不同配合比下聚丙烯纤维混凝土的抗压强度。抗压强度损失率为

$$p = \frac{f_0 - f_1}{f_0} \tag{1}$$

式中: p 为混凝土的抗压强度损失率; f_0 为未受冻融循环的混凝土初始抗压强度; f_1 为混凝土冻融循环后的抗压强度。

表 3 为不同配合比聚丙烯纤维混凝土的抗压强度。

图 1 为不同配合比聚丙烯纤维混凝土的抗压强度随冻融循环次数的变化曲线,由此可以直观地看到混凝土强度等级和引气剂对冻融循环抗压强度的影响。C40 混凝土初始抗压强度明显高于 C30 混凝土,并且未添加引气剂的混凝土抗压强度高于掺加引气剂的同等级混凝土。在冻融 50 次后,C30 和 C40 混凝土抗压强度都出现下降;在冻融循环 100 次后,3 组混凝土抗压强度相比冻融 50 次后有所增

表 3 不同冻融循环次数下混凝土的抗压强度

Tab. 3 Concrete compressive strength with different times of freezing-thawing cycles MPa

编号	a	b	c	d
0	51.723	43.915	69.183	55.835
50	43.046	26.223	56.307	48.301
100	51.223	28.839	59.479	42.716
150	38.949	31.103	47.266	30.583
200	27.655	22.375	45.273	34.821

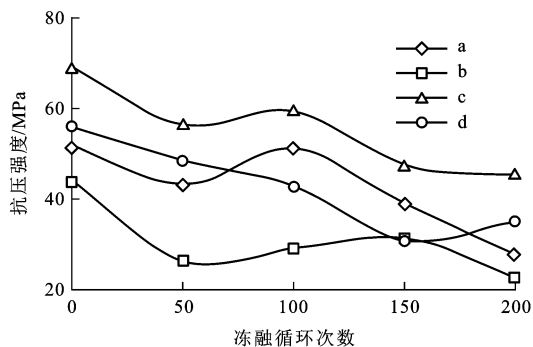


图 1 不同配合比下抗压强度随冻融循环次数的变化曲线

Fig. 1 Variation curves of compressive strength with times of freezing-thawing cycles under different mix proportions

强,说明冻融前混凝土水化不完全,在冻融过程中发生了水化反应。

图 2 为不同配合比聚丙烯混凝土的抗压强度损失率曲线。可知:冻融循环 50 次后,掺加引气剂 C30 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率高达 40.29%,而未掺加引气剂的 C30 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率和 C40 聚丙烯纤维混凝土相似,a、c、d 的抗压强度损失率分别为 16.78%、18.61%、13.49%;冻融循环 100 次后,C30 聚丙烯纤维混凝土和 C40 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率都出现下降趋势,d 组除外;在冻融循环 200 次之

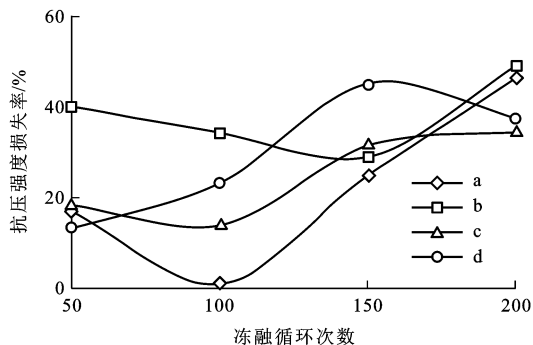


图 2 不同配合比下抗压强度损失率随冻融循环次数的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of compressive strength loss rate with times of freezing-thawing cycles under different mix proportions

后,C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率都出现增长趋势,d 组除外,冻融循环 200 次后 a、b、c、d 等 4 组不同配合比聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率分别为 46.53%、49.05%、34.56%、37.64%,C40 聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率明显低于 C30 聚丙烯纤维混凝土,掺加引气剂聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率略高于未掺加引气剂聚丙烯纤维混凝土,引气剂对聚丙烯纤维混凝土的抗压强度具有不利影响。

2.2 纵波波速

超声波测试采用中国科学院武汉岩土所研发生产的 RSM-SY5(T)型非金属声波检测仪,它由声波检测装置、导线、发射和接收换能器组成,纵波换能器频率为 50 kHz,横波换能器频率为 200 kHz。声波检测仪的采样间隔为 0.1~200 μ s,记录长度为 0.5~1 kB(可调),发射电压为 500、1 000 V(可选),放大增益为 100 dB,发射脉宽为 0.1~100 μ s(连续可调),频带宽度为 0.3~300 kHz。为了使测试结果具有可比性,整个测试过程中声波检测仪的发射脉宽、增益等参数设置一致。

超声波波速测量的实质是测量超声波通过试件的传播时间,要正确测量声波的传播时间,必须正确修正声时、识别波的类型以及判定首波。纵波声时、横波声时、纵波波速、横波波速分别为

$$t_1 = t_2 - t_3 - t_4 \quad (2)$$

$$t_5 = t_6 - t_3 - t_4 \quad (3)$$

$$V_1 = \frac{L}{t_1} \quad (4)$$

$$V_2 = \frac{L}{t_5} \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_5 分别为修正后的纵波、横波声时; t_2 、 t_6 分别为修正前的纵波、横波声时; t_3 为系统延迟; t_4 为声时修正值; V_1 、 V_2 分别为纵波、横波波速; L 为试件的实测长度。

通过超声波检测仪对棱柱体试件进行冻融后纵波波速的测试,测试结果见表 4、图 3。可知:未掺加引气剂的 C40 聚丙烯纤维混凝土的初始纵波波速比未掺加引气剂的 C30 聚丙烯纤维混凝土的初始纵波波速大,并且掺加引气剂的混凝土的初始纵波波速也出现同样情况,这与混凝土强度设计相符;未掺加引气剂的 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土初始纵波波速都比掺加引气剂的初始纵波波速大;冻融循环 150 次后,聚丙烯纤维混凝土的纵波波速都快速下降;冻融循环 300 次后,a、b、c、d 组聚丙烯纤维

表 4 不同冻融循环次数下纵波波速

Tab. 4 Longitudinal wave velocities with different times of freezing-thawing cycles

		km · s ⁻¹			
		freezing-thawing cycles			
编号		a	b	c	d
冻融 循环 次数	0	4.240	3.888	4.366	4.117
	50	4.167	3.846	4.167	3.960
	100	4.167	3.846	4.167	3.960
	150	4.082	3.810	4.040	3.774
	200	4.000	3.636	3.883	3.738
	250	3.922	3.636	3.670	3.738
	300	3.883	3.636	3.636	3.636

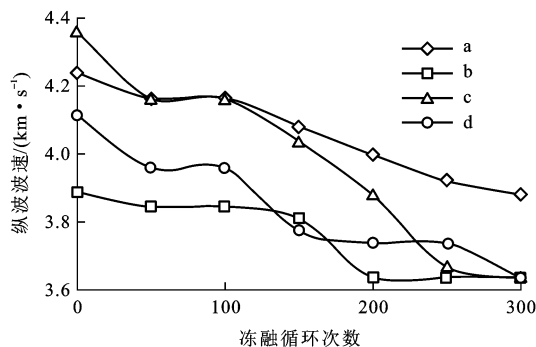


图 3 不同冻融循环次数下纵波波速的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of longitudinal wave velocity with different times of freezing-thawing cycles

混凝土的纵波波速分别降低了 8.42%、6.48%、16.72%、11.68%，掺加引气剂的 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土的纵波速度下降幅度都较未掺加引气剂的更小，说明引气剂对冻融后聚丙烯纤维混凝土纵波波速具有有利影响，但是冻融循环 300 次后 C40 聚丙烯纤维混凝土纵波波速比 C30 聚丙烯纤维混凝土纵波波速下降幅度更大。

2.3 质量损失

混凝土在冻融循环试验中，其质量会发生变化，采用感量为 1 g 的电子天平对不同冻融循环次数的混凝土进行质量测量，以研究其质量变化规律。每冻融循环 50 次后擦去表面水分测量质量，参照冻融试验标准，其质量损失率达到 5% 即为失效。混凝土质量损失率计算式为

$$W = \frac{G_0 - G_1}{G_0} \quad (6)$$

式中： W 为混凝土质量损失率； G_0 为冻融前的混凝土原始质量； G_1 为冻融后的混凝土质量。

表 5 为不同配合比 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土在不同冻融循环次数下的质量。可知：不同配合比聚丙烯纤维混凝土的质量损失随冻融次数的增加而增加。

表 5 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土质量

Tab. 5 Masses of polypropylene fiber reinforced concrete with different times of freezing-thawing cycles

		kg			
		freezing-thawing cycles			
编号		a	b	c	d
冻融 循环 次数	0	9.356	9.228	9.705	9.427
	50	9.332	9.218	9.686	9.396
	100	9.319	9.216	9.686	9.396
	150	9.315	9.212	9.684	9.394
	200	9.309	9.207	9.682	9.394
	250	9.306	9.207	9.657	9.391
	300	9.301	9.204	9.653	9.358

图 4 为不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土质量的变化曲线。可知：不同配合比 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土的质量损失随冻融次数的增加而线性增加，但质量损失率都较低，可见聚丙烯纤维的掺加增强了混凝土抗剥蚀能力，这一点在试验过程中也得到了验证，即试验过程中几乎看不到聚丙烯纤维混凝土表面的剥蚀现象，聚丙烯纤维混凝土表面的冻融损伤层非常小。

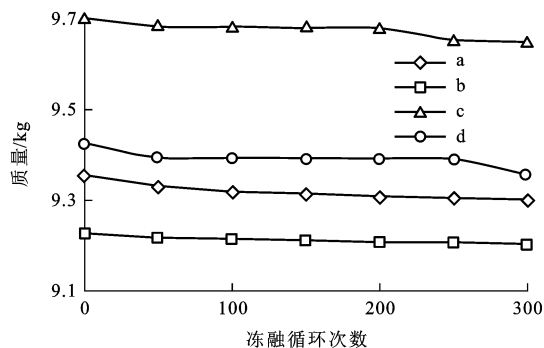


图 4 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土质量的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of mass for polypropylene fiber reinforced concrete with different times of freezing-thawing cycles

图 5 为不同配合比 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土在不同冻融循环次数下的质量损失率变化曲线。可知：在冻融作用下，掺加了引气剂的 C30 聚丙烯纤维混凝土的质量损失率更小，而冻融作用下掺加了引气剂的 C40 聚丙烯纤维混凝土的质量损失率比未掺加引气剂的 C40 聚丙烯纤维混凝土更高，并且总体都比 C30 聚丙烯纤维混凝土的质量损失率高。

2.4 冻弹性模量

根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)，采用共振法测定聚丙烯纤维混凝土棱柱体试件的动弹性模量，计算公式为

$$E = 13.244 \times 10^{-4} G L^3 F^2 / A^4 \quad (7)$$

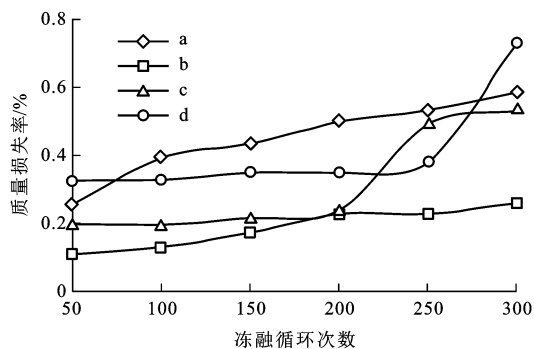


图 5 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土
质量损失率的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of mass loss rate for polypropylene fiber reinforced concrete with different times of freezing-thawing cycles

式中: E 为混凝土动弹性模量; A 为试件的边长; l 为试件的长度; G 为试件的质量, 精确到 0.01 kg; F 为试件横向振动时的基频振动频率。

通过共振法得到的 4 组不同配合比聚丙烯纤维混凝土的动弹性模量见表 6、图 6。可知: C40 聚丙烯纤维混凝土的动弹性模量比 C30 聚丙烯纤维混凝土大, 且掺加引气剂的聚丙烯混凝土都比同强度设计标准的未掺加引气剂的动弹性模量小; 当冻融次数小于 200 时, 所有配合比的聚丙烯纤维混凝土的动弹性模量均缓慢下降; 当冻融次数达到 200 时, 所有配合比的聚丙烯纤维混凝土的动弹性模量都出现急剧下降, 特别是未掺加引气剂的 C40 聚丙烯纤维混凝土, 降幅达到 34.99%; 当冻融次数达到 300 时, 4 组聚丙烯纤维混凝土动弹性模量的降幅分别为 46.54%、35.72%、54.41%、53.72%, C30 聚丙烯纤维混凝土在冻融循环作用下的动弹性模量比 C40 聚丙烯纤维混凝土衰减得更慢。

表 6 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土动弹性模量

Tab. 6 Dynamic elastic moduli of polypropylene fiber reinforced concrete with different times of freezing-thawing cycles GPa

编号	a	b	c	d
0	41.92	34.46	45.41	38.68
50	39.72	34.00	43.93	37.27
100	40.20	33.77	43.44	37.65
150	40.56	34.17	42.17	37.93
200	39.31	30.29	29.52	33.39
250	27.62	24.80	25.45	24.12
300	22.41	22.15	20.70	17.90

2.5 损伤量

混凝土的损伤老化或性能的衰减可统一用损伤量 D 描述^[25-28], 并用弹性模量定义为

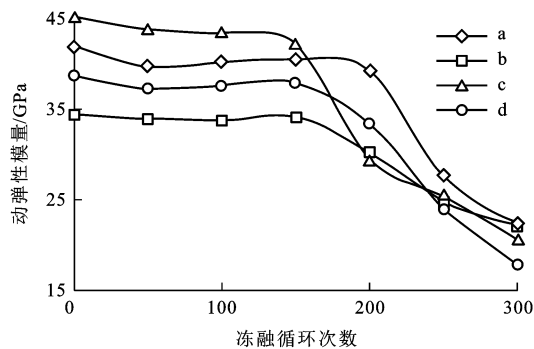


图 6 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土
动弹性模量的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of dynamic elastic modulus for polypropylene fiber reinforced concrete with different times of freezing-thawing cycles

$$D = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \quad (8)$$

式中: E_0 为初始弹性模量; E_1 为冻融损伤后的动弹性模量。

图 7 为不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土损伤量的变化曲线。可知: 在冻融循环 150 次前, C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土的损伤量都较小, 且损伤量增长较慢; 在冻融循环 150 次后, C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土的损伤量迅速增长, 并且 C40 聚丙烯纤维混凝土的损伤量高于 C30 聚丙烯纤维混凝土; 在相同的冻融循环次数下, 未掺加引气剂的 C40 聚丙烯纤维混凝土的损伤量最大; 在冻融次数为 300 时, 聚丙烯纤维混凝土的损伤量从大到小依次为: C40(未掺加引气剂)、C40(掺加引气剂)、C30(未掺加引气剂)、C30(掺加引气剂), 掺加了引气剂的 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土的损伤量都低于未掺加引气剂的 C30 和 C40 聚丙烯纤维混凝土, 说明引气剂对冻融循环作用下的聚丙烯纤维混凝土损伤具有一定的抑制作用; 聚丙烯纤维混凝土抗冻性

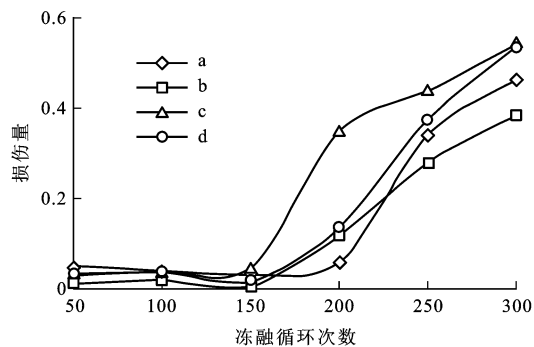


图 7 不同冻融循环次数下聚丙烯纤维混凝土损伤量的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of damage amount for polypropylene fiber reinforced concrete with different times of freezing-thawing cycles

能的改善效果从大到小依次为:C30(掺加引气剂)、C30(未掺加引气剂)、C40(掺加引气剂)、C40(未掺加引气剂)。

3 结 语

(1)在冻融循环50次后,C30和C40聚丙烯纤维混凝土的抗压强度都出现下降;在冻融循环100次后,C30和未掺加引气剂的C40混凝土的抗压强度相比冻融循环50次后有所增强,冻融前混凝土水化不完全,在冻融过程中发生了水化反应。同时,C40聚丙烯纤维混凝土的抗压强度损失率明显低于C30聚丙烯纤维混凝土,掺加引气剂的聚丙烯混凝土的抗压强度损失率略高于未掺加引气剂的聚丙烯纤维混凝土,引气剂对聚丙烯纤维混凝土的抗压强度具有不利影响。

(2)超声纵波波速测试结果表明:C40聚丙烯纤维混凝土的初始纵波波速总体比C30聚丙烯纤维混凝土大,未掺加引气剂的C30和C40聚丙烯纤维混凝土的初始纵波波速都比掺加引气剂的大;经过冻融循环作用后,C40聚丙烯纤维混凝土的纵波波速快速降低,下降值远远大于C30聚丙烯纤维混凝土的纵波速度下降值;冻融循环后掺加引气剂的C30和C40聚丙烯纤维混凝土的纵波速度下降幅度都较未掺加引气剂的更小,引气剂对冻融后聚丙烯纤维混凝土的纵波波速具有有利影响。

(3)在冻融循环作用下,掺加了引气剂的C30聚丙烯纤维混凝土的质量损失率更低,而冻融作用下掺加了引气剂的C40聚丙烯纤维混凝土的质量损失率则比未掺加引气剂的C40聚丙烯纤维混凝土更高,并且总体都比C30聚丙烯纤维混凝土的质量损失率高。

(4)聚丙烯纤维混凝土的损伤量随着冻融次数的增加而增大,在冻融次数为300时,聚丙烯纤维混凝土的损伤量从大到小依次为:C40(未掺加引气剂)、C40(掺加引气剂)、C30(未掺加引气剂)、C30(掺加引气剂)。聚丙烯纤维混凝土抗冻性能的改善效果从大到小依次为:C30(掺加引气剂)、C30(未掺加引气剂)、C40(掺加引气剂)、C40(未掺加引气剂)。

参考文献:

References:

[1] DETWILER R J, DALGLEISH B J, WILLIAMSON R B. Assessing the durability of concrete in freezing and thawing[J]. ACI Materials Journal, 1989, 86(1): 29-35.

[2] SOROUSHA P, NAGI M, OKWUEGBU A. Freeze-thaw

durability of lightweight carbon fiber reinforced cement composites[J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(5): 491-494.

[3] ALEXANDER M G, MAGEE B J. Durability performance of concrete containing condensed silica fume[J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(6): 917-922.

[4] CAI H, LIU X. Freeze-thaw durability of concrete: ice formation process in pores[J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(9): 1281-1287.

[5] MOUKWA M, AITCIN P C, PIGEON M, et al. Freeze-thaw tests of concrete in sea water[J]. ACI Materials Journal, 1989, 86(4): 360-366.

[6] COHEN M D, ZHOU Y, DOLCH W L. Non-air-entrained high-strength concrete—is it frost resistant?[J]. ACI Materials Journal, 1992, 89(4): 406-415.

[7] 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, 34(4): 80-84, 98.

NIU Di-tao, JIANG Lei, BAI Min. Experimental analysis on the frost resistance of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2012, 34(4): 80-84, 98. (in Chinese)

[8] 王玲,李刚. 纤维混凝土在冻融循环、冻融-氯盐共同作用下的耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2002(12): 43-46.

WANG Ling, LI Gang. Durability of fiber concrete on the action of freezing-thawing cycles and on the simultaneous actions of freezing-thawing cycles and deicing[J]. Concrete, 2002(12): 43-46. (in Chinese)

[9] 陈柳灼,张广泰,黄伟敏,等. 纤维混凝土在冻融循环下的损伤研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(5): 145-150.

CHEN Liu-zhuo, ZHANG Guang-tai, HUANG Wei-min, et al. The injury research of fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(5): 145-150. (in Chinese)

[10] 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 Wei-dong, SU Wen-ti, WANG Yi-min. 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)

[11] 李燕,申向东. 不同纤维掺量轻骨料混凝土冻融循环后力学性能及损伤量的研究[J]. 工程力学, 2009, 26(增1): 81-83, 93.

LI Yan, SHEN Xiang-dong. The research on mechanics and blemish degree of different fiber content lightweight aggregate concrete after freeze-thaw cycle[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(S1): 81-83, 93. (in Chinese)

[12] ÇAVDAR A. Investigation of freeze-thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 463-472.

[13] SHANG Huai-shuai, SONG Yu-pu. Behavior of air-entrained concrete under the compression with constant confined stress after freeze-thaw cycles[J]. Cement and Concrete Composites, 2008, 30(9): 854-860.

[14] 江凯,苏谦,冯旭. 早强型含水不饱和聚氨酯混凝土力

- 学性能[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 10-17.
- JIANG Kai, SU Qian, FENG Xu. Mechanical property of early-strength water-containing unsaturated polyurethane concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(2): 10-17. (in Chinese)
- [15] SHANG Huai-shuai, SONG Yu-pu, QIN Li-kun. Experimental study on strength and deformation of plain concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles[J]. Building and Environment, 2008, 43(7): 1197-1204.
- [16] 肖前慧. 冻融环境多因素耦合作用混凝土结构耐久性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- XIAO Qian-hui. Concrete structure durability in freezing-thawing circumstance based on multi-factor effects [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010. (in Chinese)
- [17] 黄 星, 李东庆, 明 锋, 等. 冻结粉质黏土声学特性与物理力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1489-1496.
- HUANG Xing, LI Dong-qing, MING Feng, et al. Experimental study on acoustic characteristics and physic-mechanical properties of frozen silty clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1489-1496. (in Chinese)
- [18] 黄 星, 李东庆, 明 锋, 等. 冻结重塑黄土单轴加载过程中声波传播特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1660-1667.
- HUANG Xing, LI Dong-qing, MING Feng, et al. Experimental study on acoustic wave propagation properties of frozen remolded loess during uniaxial loading process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1660-1667. (in Chinese)
- [19] 王大雁, 朱元林, 马 巍, 等. 冻土超声波波速与冻土物理力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1837-1840.
- WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, MA Wei, et al. Testing study on relationship between ultrasonic wave velocities and physic-mechanical property of frozen soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1837-1840. (in Chinese)
- [20] WANG Da-yan, ZHU Yuan-lin, MA Wei, et al. Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 44(1): 12-19.
- [21] 王大雁, 马 巍, 常小晓, 等. 冻融循环作用对青藏黏土物理力学性质的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4313-4319.
- WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Physico-mechanical properties changes of Qinghai-Tibet clay due to cyclic freezing and thawing [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(23): 4313-4319. (in Chinese)
- [22] 邴 慧, 何 平. 冻融循环对含盐土物理力学性质影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1958-1962.
- BING Hui, HE Ping. Influence of freeze-thaw cycles on physical and mechanical properties of salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1958-1962. (in Chinese)
- [23] 杨成松, 何 平, 程国栋, 等. 含盐冻结粉质黏土单轴抗压强度试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(1): 144-148.
- YANG Cheng-song, HE Ping, CHENG Guo-dong, et al. Uniaxial compressive strength of frozen saline silty clay[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(1): 144-148. (in Chinese)
- [24] SHE Wei, ZHANG Yun-sheng, JONES M R. Using the ultrasonic wave transmission method to study the setting behavior of foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 51: 62-74.
- [25] 张立翔, 王时超, 赵造东. 混凝土疲劳损伤强度可靠度置信限分析[J]. 工程力学, 2004, 21(4): 139-143, 132.
- ZHANG Li-xiang, WANG Shi-chao, ZHAO Zao-dong. Analysis of reliability confidence limits of fatigue damage strength of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(4): 139-143, 132. (in Chinese)
- [26] 丰茂东, 李建波, 林 皋, 等. 随机力学参量对混凝土细观损伤演化的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(4): 1-6.
- FENG Mao-dong, LI Jian-bo, LIN Gao, et al. Influence of stochastic mechanical parameters on meso-damage evolution of concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(4): 1-6. (in Chinese)
- [27] 金 玉, 王向东, 徐道远, 等. 基于无损弹塑性模型的混凝土损伤定量分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003, 31(6): 659-661.
- JIN Yu, WANG Xiang-dong, XU Dao-yuan, et al. Elastic-plastic undamaged model-based quantitative analysis of concrete damage[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2003, 31(6): 659-661. (in Chinese)
- [28] 蒋国平, 焦楚杰. 基于 SHPB 试验的钢纤维混凝土损伤研究[J]. 混凝土, 2009(3): 24-25, 43.
- JIANG Guo-ping, JIAO Chu-jie. SHPB experimental damage investigation used for steel-fiber reinforced concrete [J]. Concrete, 2009(3): 24-25, 43. (in Chinese)