

橡胶颗粒-钢纤维混掺对碾压混凝土抗冻性及抗冲击性能的影响

龚升, 张武满*, 张劲松

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 本文研究了在质量分数为 25% 的醋酸钾 (KAc) 为冻融介质的环境中, 橡胶颗粒 (RP)-钢纤维 (SF) 混掺对碾压混凝土 (RCC) 抗冻性及抗冲击性能的影响, 获得了冻融过程中 RCC 的抗弯冲击性能、相对动弹性模量、质量损失、微观形貌及孔结构变化等参数。结果表明: RCC 累计质量损失随冻融次数增加而增大, RP 对质量损失的影响较小, 而 SF 能较明显控制质量损失快速增长, 300 次冻融循环后累计质量损失仅 83.94 g/m²; RP 能降低 RCC 的总孔隙率约 0.6%, 而 SF 能有效降低总孔隙率, 但冻融后期锈蚀作用会导致总孔隙率迅速增长; SF 能极大提高 RCC 提高抗弯冲击性能, 试验条件下抗冲击次数从 3~5 次水平提升至 140~170 次水平, 而 RP 对冲击性能并无明显影响, 冻融结束掺有 SF 试验组 RCC 初、终裂次数降幅超过 70%, 但终裂次数仍达到 30~40 次的水平, 绝对韧性均随冻融次数增加逐渐降低; RCC 相对动弹性模量均表现出先降低后缓慢回升的规律, 掺有 SF 试验组下降阶段相对更短且幅度更小, 最大仅 8%, 而 RP 影响并不明显, 但 4 组降低程度均在 10% 内。

关键词: 碾压混凝土; 橡胶颗粒; 钢纤维; 抗冲击性能; 冻融循环; 微观分析

中图分类号: TB332; TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)08-2199-09

Frost resistance and impact properties of roller compacted concrete mixed with rubber particles and steel fibers

GONG Sheng, ZHANG Wuman*, ZHANG Jinsong

(School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, the frost resistance and impact resistance of roller compacted concrete (RCC) mixed with rubber particles (RP) and steel fiber (SF) were investigated in 25% (by mass) potassium acetate (KAc) as the medium in freezing-thawing cycles. The flexural impact performance, relative dynamic elastic modulus, mass loss, microstructure, and pore structure of RCC were measured. The results show that the accumulated mass loss of RCC increases with the increase of freeze-thaw cycles. The RP have slight effect on the mass loss, the total porosity, the impact property and relative dynamic elastic modulus of RCC. However, the SF can obviously control the rapid growth of the mass loss and improve the flexural impact property. The cumulative mass loss of RCC with 300 freeze-thaw cycles is only 83.94 g/m². The impact number of RCC with 1.3% (by volume) SF raises from 3—5 to 140—170. The initial and final impact number decreases by 70% after RCC specimens being subjected to 300 freeze-thaw cycles. The relative dynamic elastic modulus firstly decreases and then has a slow increase at the later stage. The maximum loss of relative dynamic elastic modulus is 8% when the SF reinforced RCC with 300 freeze-thaw cycles. The loss of relative dynamic elastic modulus of all specimens is less than 10%.

Keywords: roller compacted concrete; rubber particles; steel fiber; impact resistance; freeze-thaw cycles; microscopic analysis

收稿日期: 2017-07-12; 录用日期: 2017-09-07; 网络出版时间: 2017-09-20 15:42

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170920.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (51378042)

通讯作者: 张武满, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为混凝土结构耐久性 E-mail: wmzhang@buaa.edu.cn

引用格式: 龚升, 张武满, 张劲松. 橡胶颗粒-钢纤维混掺对碾压混凝土抗冻性及抗冲击性能的影响[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2199-2207.

GONG Sheng, ZHANG Wuman, ZHANG Jinsong. Frost resistance and impact properties of roller compacted concrete mixed with rubber particles and steel fibers[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2199-2207 (in Chinese).

为了保证寒冷地区机场冬季的正常运行,需要在飞机表面和混凝土跑道表面喷洒大量除冰液。目前,国内外常用的机场道面除冰液主要是由醋酸钙镁(CMA)、醋酸钾(KAc)和醋酸钠(NaAc)等醋酸盐组成^[1]。喷洒道面除冰液后,混凝土跑道在冻融环境下,会出现严重冻融劣化现象,造成力学性能降低^[2]。而随着我国民航客机日益向大型化、重载化方向发展,机场道面承受的冲击荷载也在逐渐增大。冻融劣化的道面混凝土在飞机起降时的冲击作用下,很容易就会产生冲击微裂缝,最终破裂,若不能及时修补,将会给飞行安全带来极大的隐患。

在寒冷地区,混凝土抗冻融性不足是造成耐久性破坏的主要原因,特别是在有水又受冻的环境下工作的混凝土,对抗冻融性的要求更高^[3],因此研究混凝土材料冻融环境下力学性能的变化规律和耐久性显得尤为重要。根据已有研究成果,影响混凝土抗冻性的主要因素包括^[4-6]含气量、水灰比、混凝土的饱水状态、混凝土的受冻龄期、水泥品种、集料质量及外加剂。目前,机场道面多采用碾压混凝土(Roller compacted concrete, RCC),国内外学者针对素 RCC 存在的一些缺陷,常采用掺加橡胶 RP 粉或纤维材料的方式优化。较之普通 RCC, RP/RCC 具有抗侵蚀性能好^[7]等优点,但抗压、抗折和劈裂抗拉强度低^[7-8];而纤维材料使原属于脆性材料的混凝土变为具有一定塑性的复合材料^[9],从而使改性混凝土具有优良的抗裂、抗弯、耐疲劳和耐磨耗等力学性能^[10],考虑钢纤维(SF)掺量过大时易成团和与骨料粘结不佳, SF 掺入过多会明显影响混凝土和易性,因而 SF 掺量并非越大越好。将 RP 和 SF 按照一定的比例加入 RCC 中,是否能够发挥 RP 和 SF 两种材料的优势,从而提高 RCC 抗弯冲击性能和抗冻融性能,改善 RCC 在受冻环境下的耐久性值得进一步研究。

另一方面,目前关于机场道面除冰盐对素混凝土的冻融规律和冻融下力学性能研究较丰富,国内的余红发^[11]对于除冰液下混凝土抗冻性做了相关研究,国外也有不少研究成果^[12-13],发现:混凝土在不同冻融介质中的抗冻融循环次数与水中抗冻融循环次数存在高度的线性相关性,此相关关系仅与溶液的种类和浓度有关;而冻融介质的冰点随其浓度的升高而降低,冻融介质浓度越高,混凝土抗冻

性越好^[14];混凝土的盐冻破坏是由盐溶液的结冰压及混凝土内部毛细管吸水饱水度综合作用导致的^[15];与同浓度稀释乙二醇(EG)、丙二醇(PG)、CMA 等冻融介质相比,混凝土在 KAc 溶液中冻融破坏最严重。张武满等^[16]研究了冻融循环下 SF/混凝土的冲击性能,发现:冻融作用降低了试块底面产生微裂缝所需的冲击次数;通过 SEM 观察,发现冻融使混凝土内部出现十分微小的冻融破坏裂纹,且随着冻融次数的增加,微裂缝的数量和宽度都有所增加。冲击产生宏观裂缝后,继续增加的冲击作用会减少冻融作用后的质量损失^[17-19]。但目前关于掺入 RP 和纤维混混凝土的抗冻性和冻融条件下的抗弯冲击性能研究较少。已有成果表明 RP 和纤维掺入混凝土能有效降低混凝土受冻融循环而发生的损伤劣化程度,明显提高混凝土的抗冻融循环性能。而且随着 RP 和纤维掺量的增加,混凝土相对动弹模量下降趋势越平缓^[20]。因此,研究 RP-SF 混掺碾压混凝土抗盐冻性能及冻融环境下抗弯冲击性能的相互关系和发展规律,同时与单掺 RP 和 SF 的混凝土材料做对比具有一定的工程意义。此外,这项研究成果也可以推广到市政工程和高速公路工程的实际应用中。

1 试验材料及方法

1.1 原材料

水泥(C):曲阜中联水泥厂生产的 P.I 42.5 混凝土外加剂检验专用基准水泥,性能指标参见表 1;骨料(S):粗骨料采用粒径为 5~20 mm 级配良好的碎石,细骨料采用细度模数为 2.55 的河砂,表观密度为 2 650 kg/m³,堆积密度为 1 565 kg/m³;减水剂(WR):采用北京世纪洪雨科技公司生产的 HY801 聚羧酸高性能减水剂;引气剂(AEA):BASF 公司生产的 A202 型号混凝土引气剂;拌合水(W):北京市政普通自来水;跑道除冰液(DF):采用成都民航六维航化有限责任公司生产的 NW-056A 机场道面除冰液,主要成分是醋酸钾(KAc),比重(20℃)为 1.289±0.015,冰点为(-20.0±4)℃(50%W/W 水溶液),pH 为 10.6±0.5;橡胶颗粒(RP):河北某公司生产的废旧轮胎 RP,粒径为 1~3 mm,表观密度为 1 023 kg/m³;钢纤维(SF):采用宏瑞莱(北京)科技有限公司生产的“瑞莱”牌水溶性胶水粘结成排 SF(型号:HR-G CW03-80/60-1000),性能指标见表 2。

表 1 基准水泥的物理和基本力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of cement

Fineness 0.08/%	Density/ (g·cm ⁻³)	Blaine fineness/ (m ² ·kg ⁻¹)	Standard consistency/ %	Stability/ mm	Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
					Initial setting	Final setting	3 d	28 d	3 d	28 d
0.6	3.15	349	25.8	0.5	130	195	5.8	—	29.2	—

表 2 钢纤维(SF)物理和力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of
steel fiber(SF)

Equivalent diameter/mm	Average length/mm	Aspect ratio/%	Tensile strength/MPa
0.75	60	80	1 170

1.2 试验配合比和试验组设计

本试验选取的基准 RCC 配合比按照《机场道面水泥混凝土配合比设计技术标准》(GJB 1578—92)^[21]设计,设计抗折强度为 8.0 MPa,抗压强度等级为 C60,水泥用量为 315 kg/m³,质量比为水:水泥:砂:石=1:2.89:8.21:11.08,减水剂掺量为水泥用量的 2.76%,引气剂掺量为 7.5×10⁻⁵。28 天立方体抗压强度为 61.3 MPa,抗折强度为 8.61 MPa。

根据已有的研究成果^[7-10],RP 掺入基准碾压混凝土中常采用等体积取代砂方式,粒径多为 1~3 mm,体积取代率多为 10%~20%,SF 的体积掺入量常为 1.0%~2.0%。本试验选取 RP 体积取代率 10%、SF 掺入量 1.3% 进行试验。共设置了 4 个试验组,素混凝土组(A 组)、掺 RP 组(B 组)、掺 SF 组(C 组)、RP-SF 混掺组(D 组),每组 21 块试件,共制备 84 块尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的试件,各组配合比见表 3。试验用混凝土制备:按照配合比掺入各项材料,在 60 L 混凝土强制搅拌机中搅拌 180 s;后将混凝土拌合料用碾压捣捣机振捣压实制作成尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件。在 20℃ 环境下,覆盖塑料薄膜养护 24 h 后拆模,然后放入温度(20±2)℃、

相对湿度 95% 以上的标准养护室中养护 28 天。

1.3 试验方法

本试验中冻融介质选择质量分数为 25% 的 KAc 型机场道面除冰液水溶液,与机场道面在除冰作业时所处稀释除冰液环境近似,冰点约为-10~-8℃,与北京的冬季平均最低气温(-9℃)大致相当。冻融试验采用快速冻融法,冻融次数为 0~300 次。本次试验每 50 次测定 RCC 的质量损失、动弹性模量及抗冲击性能。此外作为对照,还测定了同期处于标准养护条件下试块的动弹性模量。

质量损失量采用如下方法测量,即各阶段冻融后将试件取出,冲洗试件表面和冻融试件筒并收集冲洗后的液体,用加厚的试验滤纸过滤收集试件表面损失物,并干燥过滤滤纸,称量滤纸前后的质量获得试件每一冻融阶段的质量损失值(M),并按下式计算单位表面积质量损失(M_{loss}):

$$M_{\text{loss}} = \frac{M}{S} = \frac{M}{0.18 \text{ m}^2}$$

(1)

式中, S 为试件表面积,为 0.18 m²。相对动弹性模量测定采用天津市京润建筑仪器厂生产的 DT-16 型动弹仪测定。在 4 个试验组中分别选出 3 块试件,每 50 次冻融循环测定 4 组试件的动弹性模量,并按下式计算相对动弹性模量(E_r):

$$E_r = \frac{E_n}{E_0} = \frac{t_n^2}{t_0^2} \times 100\%$$

(2)

式中: E_n 和 t_n^2 分别为试件在试验冻融介质中冻融循环 n 次时的动弹性模量和基准频率; E_0 和 t_0^2 分别为冻融循环 0 次时的动弹性模量和基准频率。抗弯冲击试验采用承德市世鹏检测设备公司生产的

表 3 碾压混凝土(RCC)试验组配合比

Table 3 Mix proportions of experimental group of roller compacted concrete(RCC)

Experimental type	Water cement mass ratio	Sand rate/wt%	SF content/wt%	Dosage of concrete/(kg•m ⁻³)							
				C	FA	A	W	WR	AEA	RP	SF
Type A	0.346	42.6	0	315	894.5	1 207	109	8.69	0.0236	0	0
Type B	0.346	40.0	0	315	805.1	1 207	109	8.69	0.0236	34.5	0
Type C	0.346	42.6	1.3	315	894.5	1 207	109	8.69	0.0236	0	101.4
Type D	0.346	40.0	1.3	315	805.1	1 207	109	8.69	0.0236	34.5	101.4

Notes: C—Cement; FA—Fine aggregate; A—Aggregate; W—Water; WR—Water reducing agent; AEA—Air entraining agent; RP—Rubber particles; SF—Steel fiber.

XJL-300B 型落锤式冲击试验机。弯曲冲击参数主要包括支座跨度、落锤高度和质量,通过改变落锤的高度和重量可以调节每次落锤的冲击力。由于弯曲冲击性能试验并没有相关具体试验标准,此次试验中参考美国 ACI544.3R—2008 规范^[22]进行这一部分试验。其中,支座跨度选取 300 mm,落锤质量为 3 kg,高度为 300 mm。

微观实验中观测样品取自试验组试件各冻融阶段表面下 5~10 mm 范围内的混凝土颗粒,观测前置于无水乙醇中保存。

SEM 试验采用日本电子株式会社的 JSM-7500F 型场发射扫描电子显微镜观察样品形貌,仪器加速电压为 15 kV。同时采用与该仪器配套的牛津仪器公司的 EDS,进行微区元素的定性和半定量分析,EDS 分辨率为 129.92 eV,测量时间为 50 s。

孔结构特征采用麦克 AutoPore IV9500 压汞仪测试。本实验中采用块状试样,实验前在干燥箱中 50℃ 环境干燥 6 h。将试样称重并记录,精确到 0.01 g。将其装入膨胀计中,密封好后安装到压汞仪上,抽真空到真空度为 99.4 kPa 以下,开始充 Hg, Hg 充满装有样品的膨胀计后,用 N₂ 调压到 3.5~10.5 kPa 之间,然后进行低压测定,最后将膨胀计置于高压舱,对膨胀计中的 Hg 进行加压,压力最高达到 200 MPa。然后借毛细管面积算出压入孔中 Hg 的体积,绘出孔径分布曲线。当压力升到预定的最大压力时,仪器自动进行降压。

2 结果与讨论

2.1 冻融循环中 RCC 的质量损失

冻融过程中的质量损失情况是衡量混凝土材料

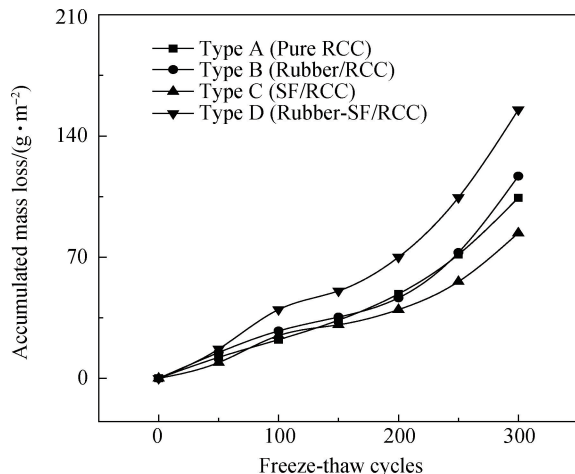


图1 RCC在冻融循环中累计质量损失

Fig.1 Accumulated mass loss during freeze-thaw cycles of RCC

抗冻性的重要指标,单位表面积的累计质量损失如图1所示。可知,4组试件冻融循环前期0~100次阶段质量损失量均增加较快,分析认为是试件外表面在成型时有部分砂浆颗粒和细骨料微粒并未与混凝土粘结成一体,仅是附着于混凝土试件表面,因此在冻融循环初期阶段即剥落脱离混凝土试件整体,产生冻融循环100次前后质量损失增加先快后慢的情况,这与已有研究成果大体一致^[23]。整体而言,4组试样0~200次冻融循环阶段质量损失增长速率均不大,A组累计仅 48.78 g/m²,B组和C组分别为 46.51 g/m²和 39.72 g/m²,相对较大的D组也仅 70.06 g/m²,而200~300次冻融循环中各组质量损失均增加1倍以上。

4组试件对比可以发现,混掺的D组质量损失大于其余3组,且随着冻融循环次数的增加差距逐渐增大;仅掺RP的B组与素混凝土A组质量损失接近,而仅掺SF的C组在整个冻融循环过程中质量损失始终小于其余各组,300次冻融时仅 83.94 g/m²,远小于D组的 155.17 g/m²。这也和试件外表面冻融破坏的情况一致。结合已有研究结论,认为RP的掺入能够改善原有RCC和易性^[9, 24],但对于碾压混凝土冻融质量损失并没有明显改善,掺入适量的SF能够增强混凝土内部粘结情况,一定程度上控制质量损失快速发展,同时也反映出RP与SF混掺时,两种掺合料也可能出现粘结不佳的情况,造成混凝土冻融损伤增大、表面剥落增加。

2.2 冻融循环中 RCC 的抗弯冲击性能

为了研究冻融次数对RP/RCC抗弯冲击性能的影响,将试件侧面产生微裂缝时的冲击次数作为初裂冲击次数;将试件底部裂缝贯穿整个截面,延伸至冲击面的冲击次数作为终裂冲击次数。SF的掺入对RCC试件的抗冲击性能影响极大,未掺有SF的A、B组试件与掺有SF的C、D组试件抗弯冲击性能存在明显差异,图2为A、B两组试件冻融循环下抗弯冲击性能变化,由于这两组抗冲击次数较少,初裂(I)和终裂(F)间隔极小,因此这两组试件数据不分析初裂相关问题;图3为C、D组冻融循环下抗弯冲击性能变化。

由图2和图3可以看出,4组试件在稀释跑道除冰液中冻融后,破坏时冲击次数均降低,这说明随着冻融次数的增加,试件抵抗冲击的能力降低。A组和B组在试验选定的冲击方式下,初裂状态无

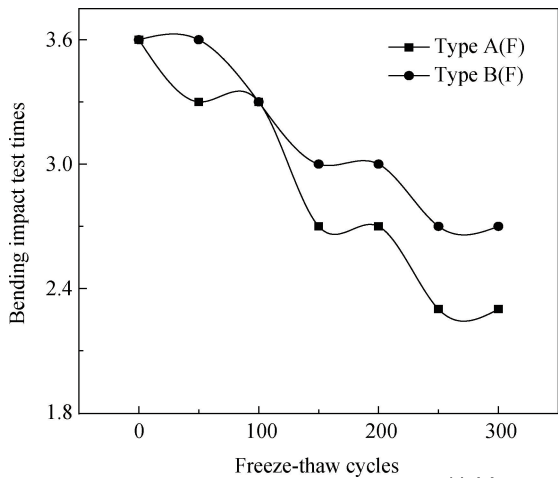


图2 A、B组 RCC 冻融循环中抗弯冲击性能

Fig. 2 Impact resistance of type A&B during freeze-thaw cycles of RCC (F—Final crack)

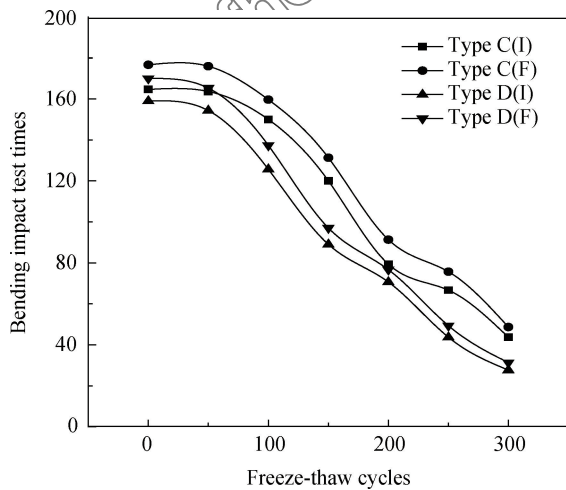


图3 C、D组 RCC 在冻融循环中抗弯冲击性能

Fig. 3 Impact resistance of type C&D during freeze-thaw cycles of RCC (I—Initial crack)

法很好体现, 终裂冲击次数变化规律近似, 均为 3~4 次逐渐降低至 2~3 次, 掺入 RP 的 B 组终裂略优于 A 组; 而掺有 SF 的 C 组和 D 组试件初裂和

终裂的冲击次数明显高于 A、B 组的试件, 0~150 次冻融循环阶段基本在 100 次冲击后才发生肉眼可见的冲击破坏, 0 次冻融时部分试件冲击断裂次数甚至超过 180 次。4 组冲击结果相比较, 可以发现 SF 的掺入与否对 RCC 试件的抗弯冲击性能有极大的影响, 掺入适量比例的 SF 能极大的改善试件抗弯冲击性能。

A 组和 B 组试件在选定冲击方式下, 从出现第一条裂缝至最终贯穿整个截面的过程非常短暂, 大约只相隔 1~2 次冲击, 此时的混凝土主要依靠骨料与水泥基体之间的物理作用抵抗冲击的能量, 表现出脆性特征。这说明添加 RP 后的混凝土与普通混凝土相比, 虽然 RP 在冲击作用下可产生一定的变形, 从而吸收能量和缓解裂缝扩展, 但是并没有像纤维/混凝土那样, 增强裂缝两端混凝土基体间的连接, 也没有表现出较好的塑性破坏形态。因此可以推测, 添加 RP 无法有效提高混凝土抗冲击性能。

结合图 3 可知, C 组和 D 组两组试件随着冻融循环次数的增加, 初裂和终裂冲击次数逐渐降低, 由 0 次冻融循环时的 164/176 和 159/170 次降低到 300 次冻融循环时的 43/48 和 27/31 次, 整个冻融循环阶段降低超过 70%。但是即使到冻融结束时, C 组和 D 组的终裂冲击次数仍然达到 30~40 次的水平。同时, 冻融循环过程中初裂与终裂对应的冲击次数之间的差值逐渐减少, 从冻融循环开始阶段的 15 次左右降低到 300 次冻融循环时的 5 次左右。如果将混凝土冲击作用下的终裂与初裂次数的差值作为绝对韧性, 这说明随着冻融次数增加两组试件的韧性逐渐降低。这可能是由于试件在冻融循环一定次数后, 试件内部微裂纹数量增加, 混凝土强度发生下降, 且结合冻融过程中试件表面锈迹的变化推测, 试件内部铁锈随着冻融循环发展增加明显, 铁锈的大量产生造成混凝土内部体积膨胀和降低了 SF 与混凝土各组分间的粘结, 造成混凝土



图4 A组素 RCC 250 次冻融循环时抗弯冲击试验

Fig. 4 Flexural impact test of group A with 250 freeze-thaw cycles of pure RCC

试件韧性降低。图 4 为素 RCC 组(A 组)250 次冻融循环试件的冲击试验中初始、初裂和终裂图。

2.3 冻融循环中 RCC 的相对动弹性模量变化

图 5 为各组试件冻融循环过程中的相对动弹性模量变化曲线,取同期放置于标准养护条件下的素 RCC 试件作为对比。可知:在 0~300 次冻融循环过程中,4 组试件相对动弹模量均表现出先快速降低、后缓慢回升的规律;其中仅掺 SF 的 C 组和混掺的 D 组在冻融循环 50 次时相对动弹模量降低至 0.95 和 0.92,后不再下降而开始逐渐上升,最终 300 次冻融循环时分别为 0.97 和 0.93,而素 RCC 的 A 组和仅掺 RP 的 B 组都是在冻融循环 150 次降低至 0.90 和 0.94 后开始缓慢上升,最终 300 次冻融循环时分别为 0.94 和 0.95,且 0~100 次冻融循环阶段降低幅度和趋势接近。

参考同期在标准养护状态下试件动弹模变化,可知,混凝土在标准养护条件下的动弹性模量是缓慢上升的。而动弹性模量反映的是混凝土内部微裂纹的发展情况,说明在标准养护的条件下,混凝土不断水化从而密实度增加,而根据渗透压假说,处于冻融循环状态下的试件会发生微裂纹生长等冻融损伤,导致动弹性模量下降。根据已有结论,混凝土试块在冻融循环中受影响厚度为表面 30 mm 内,内部结构几乎不受影响^[25]。因此,在冻融破坏和水化密实作用之间存在一个平衡点。这与各组试件相对动弹模先降低后升高的现象相符。300 次冻融循环后,4 组试件相对动弹模量总体降低程度并不大,基本都保持在 10% 以内,其中 C 组仅降低

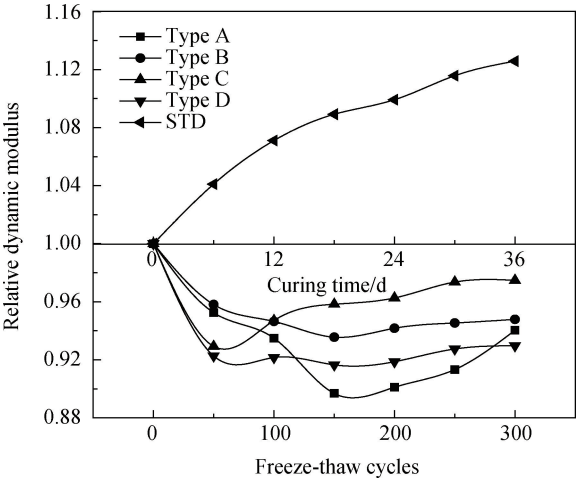


图 5 RCC 在冻融循环中相对动弹性模量变化
Fig. 5 Relative dynamic modulus changes during freeze-thaw cycles of RCC
(STD—Specimen under standard maintenance)

2.43%。这与麻海燕等学者的发现吻合^[26],即高性能混凝土具有良好的抗冻性能,即使在稀释除冰液环境中冻融达 300 乃至 400 次,相对动弹模量降低也十分有限。

2.4 RCC 在冻融循环中的微观形貌特征

图 6 为 300 次冻融循环时各组 RCC 样品砂浆位置微裂纹损伤。图 7 和图 8 为 D 组混掺碾压混凝土在冻融循环过程中砂浆位置和 SF 粘结位置的微观形貌 SEM 测试结果,其余 3 组微观形貌出现特征相似,在此不再具体说明。由图 6 和图 7 可知,冻融循环开始阶段砂浆位置在 5 000 倍放大倍率下的内部微观结构较致密,随着冻融循环的进行,在 100 次、200 次冻融阶段图像中,絮状颗粒结晶逐渐增多,在 300 次冻融结束时结晶产物明显布满整个观察区域表面,同时微裂纹损伤也大量产生。由于在 1 000 倍以上倍率下观测时, SF 与混凝土砂浆粘结位置已经难以分辨,因此图 8 中微观观测放大倍率为 1 000 倍;观测时采用低倍下找准粘结处位置并定位,随着观测倍率提升逐渐调整定位位置确保高倍率观测时位置准确。从图 8 可知, SF 粘结位置也有同样现象发生,在冻融循环开始时粘结处紧密,而在冻融结束时粘结位置出现明显的絮状颗粒结晶物。由于试验未掺入任何其他矿物掺合料,同时结合已有研究成果^[27-29]和 KAc 结晶形貌特征,可判定这些白色结晶物质应为 KAc 结晶。分析认为,在稀释 KAc 溶液冻融循环作用下, SF 锈蚀作用明显,同时 SF 锈蚀体积膨胀和 KAc 结晶影响粘结位置砂浆状况,造成 SF 与混凝土结构其

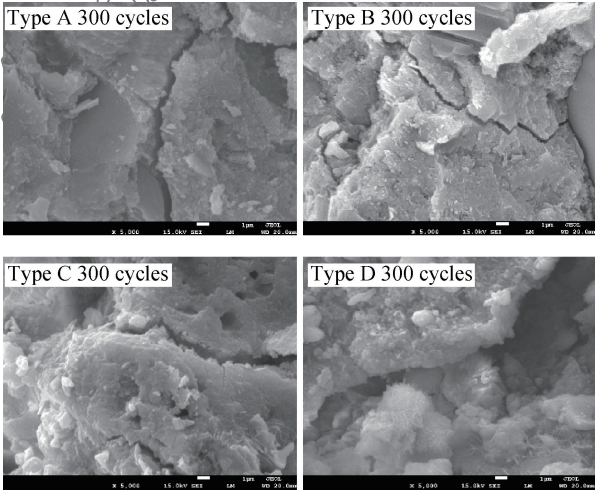


图 6 300 次冻融循环时各组 RCC 样品砂浆位置微裂纹损伤
Fig. 6 Microcracks of mortar in each group during 300 freeze-thaw cycles of RCC

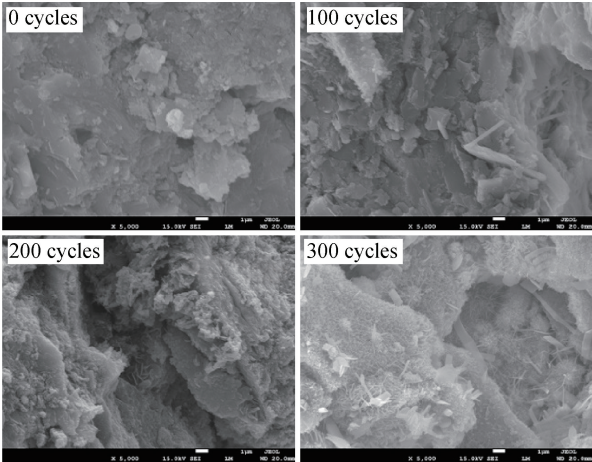


图 7 D 组 RCC 在冻融循环中各阶段砂浆位置微观形貌

Fig. 7 Microstructure of mortar of type D RCC during freeze-thaw cycles

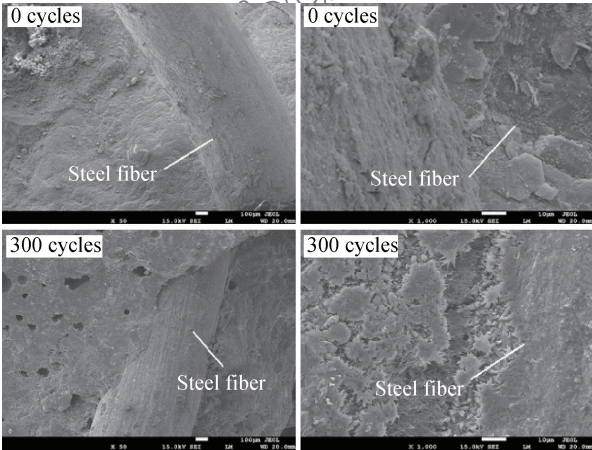


图 8 D 组 RCC 在冻融循环中 0 次和 300 次 SF 粘结位置微观形貌

Fig. 8 Microstructure at SF's bonding position of type D RCC with 0 and 300 freeze-thaw cycles

他部分粘结程度降低, 影响混凝土抗弯冲击性能和其他力学性能, 这与前述冲击试验结果一致。

2.5 RCC 在冻融过程中的混凝土孔结构特征变化

大量的研究证明, 孔隙率对混凝土的强度有着决定性的影响, 孔的其他属性(例如孔径、孔的分布、孔形和取向等)对混凝土的强度也有影响^[30]。冻融循环作用将导致混凝土内部结构原有细缝位置的损伤和强度损失加剧^[31]。图 9 和图 10 是 4 组试件冻融循环过程中的孔结构特征变化。

冻融过程中, 素 RCC 的 A 组总孔隙率与仅掺入 RP 的 B 组变化趋势相似, 但各阶段均高出约 0.6%, 同时也高于另外掺有 SF 的 2 组; 此外仅掺 RP 的 B 组中值孔径明显大于其余 3 组, 在 0~200

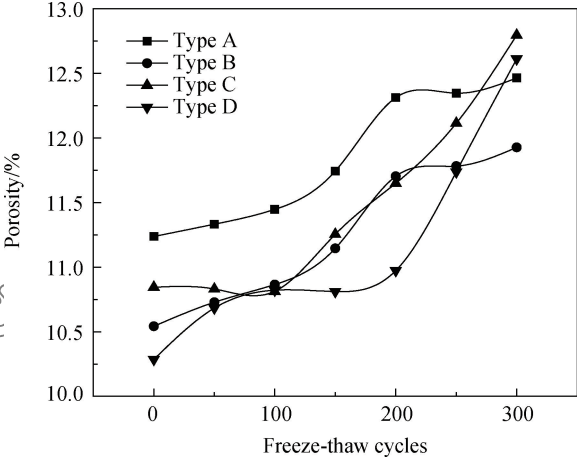


图 9 RCC 在冻融循环中总孔隙率变化

Fig. 9 Variation of total porosity during freeze-thaw cycles of RCC

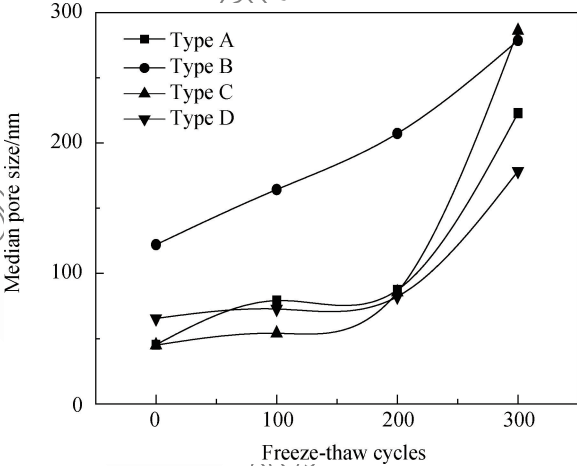


图 10 RCC 在冻融循环中中值孔径变化

Fig. 10 Variation of median pore size during freeze-thaw cycles of RCC

次冻融循环阶段比其余 3 组大出约 90 nm。这说明 RP 能够改善碾压混凝土成型时的密实程度^[7, 9], 使混凝土内部更加密实而降低孔隙率, 但其自身与混凝土其他组分粘结状况较差, 造成混凝土结构中存在的孔隙尺寸相对偏大, 这也与之前研究结果中 RP 可以明显降低混凝土的孔隙率、提高抗渗性的结论一致^[29]。掺入 SF 的 C、D 组总孔隙率与仅掺 RP 的 B 组差别不大, 中值孔径与素 RCC 的 A 组接近但明显优于 B 组, 反映 SF 能够改善碾压混凝土内部粘结状况^[30]; 但在 200~300 次冻融循环阶段, 掺入 SF 的 C、D 组中值孔径分别增加了 200.5 nm 和 96.3 nm, 这说明 SF 锈蚀程度加深导致铁锈的快速产生, SF 体积膨胀造成混凝土结构内部压力增大甚至产生微裂纹损伤, 造成孔

隙率快速升高,另一方面 C、D 两组增幅的差异间接印证了 RP 的掺入改善了混凝土抵抗冻融破坏的能力^[31]。

3 结 论

研究了橡胶颗粒(RP)-钢纤维(SF)混掺对碾压混凝土(RCC)抗冻性及抗冲击性能的影响,分析了两种材料的作用及共同工作时的性能特性,发现:

(1) 冻融循环中,试件质量损失增长速率逐渐增大,特别是 200~300 次冻融循环阶段各组质量损失均增加 1 倍以上;RP 对质量损失影响较小,300 次冻融时均在 110 g/m^2 左右,SF 能够较明显控制质量损失快速发展,累计质量损失仅 83.94 g/m^2 ,但 RP-SF 混掺并未有效降低质量损失,混掺组冻融结束累计质量损失达 155.17 g/m^2 。

(2) 掺入适量 SF 能够极大的改善试件抗弯冲击性能,试验条件下抗冲击次数从 3~5 次水平提升至 140~170 次水平,而掺入 RP 对 RP 抗弯冲击性能并无明显影响。冻融循环中,掺有 SF 的 C、D 组试件初裂和终裂次数降低超过 70%,但 300 次冻融循环时终裂次数仍达到 30~40 次的水平;绝对韧性随冻融次数增加逐渐降低。

(3) 冻融循环中 4 组试件相对动弹模量均表现出先快速降低后缓慢回升的规律;掺入 SF 的试验组动弹模量下降阶段相对更短且降低幅度更小,最大仅 5%和 8%,RP 对相对动弹模影响较小,但四组试件相对动弹模量总体降低程度均在 10%内,符合国家标准要求。

(4) 冻融过程中,RP 能明显降低碾压混凝土的总孔隙率,适量的 SF 能够降低总孔隙率,但冻融后期锈蚀作用会导致总孔隙率迅速增长;掺入 RP 会造成中值孔径偏大,而适量 SF 的掺入能够很好控制中值孔径值。

参考文献:

- [1] 中国民用航空总局. 民用航空器除冰/防冰: MH3145.49—1998[S]. 北京: 中国民航出版社, 1998: 66-68.
China's Civil Aviation Administration. De/anti-icing for civil aircraft: MH3145.49—1998[S]. Beijing: Chinese Civil Aviation Press, 1998: 66-68 (in Chinese).
- [2] 刘文博, 袁捷, 杨全兵. 除冰液对机场道面混凝土的破坏机制研究[J]. 华东交通大学学报, 2016(5): 1-6.
LIU W B, YUAN J, YANG Q B. Research on failure mechanism of deicing fluid in airport pavement concrete[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016(5): 1-6 (in Chinese).

- [3] 董树国, 张国杰, 候黎阳, 等. 核磁共振数据分析混凝土孔隙率与抗盐冻关系[J]. 电子显微学报, 2015(5): 428-432.
DONG S G, ZHANG G J, HOU L Y, et al. Analysis of the relationship between the porosity and the salt freezing resistance of concrete by NMR data[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2015(5): 428-432 (in Chinese).
- [4] SONG S M, BAO W Z, ZHAO W X, et al. Properties of concrete with high-volume limestone powder under low temperature conditions[M]. Germany: Trans Tech Publications, 2013: 4.
- [5] LIU J H, SONG S M, XU G Q, et al. Form and mechanism of sulfate attack on cement-based material made of limestone powder at low water-binder ratio under low temperature condition[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2012(1): 581-585.
- [6] HUO J F, LI W L, SONG D T, et al. Experimental study on frost resistance properties of mixed aggregate concrete with mineral admixtures[J]. WIT Transactions on Engineering Sciences, 2013(7): 413-418.
- [7] 杨春峰, 杨敏. 废旧橡胶混凝土力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2011(12): 98-100, 109.
YANG C F, YANG M. Research progress on mechanical performance of waste rubber concrete[J]. Concrete, 2011(12): 98-100, 109 (in Chinese).
- [8] 夏孝维, 黄志军. 废旧橡胶改性碾压混凝土强度试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013(8): 17-20.
XIA X W, HUANG Z J. Experimental study on strength of roller compacted concrete modified with waste rubber[J]. China Concrete and Cement Products, 2013(8): 17-20 (in Chinese).
- [9] 杨芳. 橡胶粉粒径对碾压橡胶混凝土力学性能的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
YANG F. Effect of particle size of rubber on mechanical properties of RCC[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010 (in Chinese).
- [10] 管新建. 钢纤维混凝土的力学性能及路面工程应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2003.
GUAN X J. Study on mechanical properties and pavement engineering application of steel fiber reinforced concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2003 (in Chinese).
- [11] SHI X. Impact of airport pavement deicing products on aircraft and airfield infrastructure [M]. Washington: ACRP Synthesis, 2008.
- [12] 余红发, 孙伟, 麻海燕, 等. 冻融和腐蚀因素作用下混凝土的损伤劣化参数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 1-8.
YU H F, SUN W, MA H Y, et al. Analysis of damage degradation parameters of concrete subjected to freezing-thawing cycles and chemical attack[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4): 1-8 (in Chinese).
- [13] RANGARAJU P, SOMPURA K, OLEK J. Investigation into potential of alkali-acetate-based deicers to cause alkali-silica reaction in concrete [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1979

- (1): 69-78.
- [14] 白康. 水泥混凝土在机场道面除冰液作用下的抗冻性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 20-61.
BAI K. Research on freezing-thawing durability of concrete subjetaled to airfield pavement deicer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 20-61 (in Chinese).
- [15] 李创. 混凝土在机场除冰液作用下冻融破坏的微观结构机制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011: 20-58.
LI C. Study on microstructure mechanism of freezing-thawing of concretes subjetaled to airdrome deicer[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011: 20-58 (in Chinese).
- [16] 麻海燕, 吴雅玲, 余红发, 等. 机场道面除冰液作用下大掺量粉煤灰混凝土的抗冻性[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(2): 78-83.
MA H Y, WU Y L, YU H F, et al. Freeze-thaw durability of high colume fly ash content concrete exposed to airfielf pavement deicer[J]. Journal of Architetalture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 78-83 (in Chinese).
- [17] ZHANG W M, ZHANG N, ZHOU Y. Effect of flexural impact on freeze-thaw and deicing salt resistance of steel fiber reinforced concrete[J]. Materials and Structures, 2016(49): 5161-5168.
- [18] ZHANG W M, CHEN S H, LIU Y Z. Effect of weight and drop height of hammer on the flexural impact performance of fiber-reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017(140): 31-35.
- [19] ZHANG W M, CHEN S H, ZHANG N. Low-velocity flexural impact response of steel fiber reinforced concrete subjected to freeze-thaw cycles in NaCl solution[J]. Construction and Building Materials, 2015, 104: 522-526.
- [20] 杨晨晨, 白英, 田晓宇, 等. 掺纤维橡胶混凝土抗冻性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2016(10): 3456-3460.
YANG C C, BAI Y, TIAN X Y, et al. Study on frost resistance of fiber reinforced rubberized concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016 (10): 3456-3460 (in Chinese).
- [21] 中国人民解放军总后勤部军事交通运输部. 机场道面水泥混凝土配合比设计技术标准: GJB 1578—1992[S]. 北京: 中国人民解放军总参谋部, 1992.
Military Transportation Department of the PLA General Logistics Department. Technical standard for airport pavement cement concrete mix design: GJB 1578—1992[S]. Beijing: General Staff of the Chinese Seople's Liberation Army, 1992 (in Chinese).
- [22] American Concrete Institute. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete: ACI 544.3R—2008[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2008.
- [23] 曹秀丽, 曹志翔, 喻骁. 冻融循环对混凝土质量损失及相对动弹模量影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2013(3): 125-127.
CAO X L, CAO Z X, YU X. Experimental study on the influence of freeze-thaw cycles on mass loss and relative modulus of elasticity of concrete[J]. Railway Engineering, 2013 (3): 125-127 (in Chinese).
- [24] 孟庆超. 混凝土耐久性与孔结构影响因素的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
MENG Q C. Study on the factors influencing the durability and pore structure of concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006 (in Chinese).
- [25] 张峰, 蔡建军, 牛平霞, 等. 混凝土冻融损伤厚度的超声波检测[J]. 深圳大学学报(理工版), 2012, 03: 207-210.
ZHANG F, CAI J J, NIU P X. Ultrasonic detection of freeze-thaw damage thickness of concrete [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2012, 03: 207-210 (in Chinese).
- [26] 麻海燕, 余红发, 白康, 等. 机场道面除冰液对高性能混凝土抗冻性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(4): 860-864, 879.
MA H Y, YU H F, BAI K, et al. Effect of deicing fluid on frost resistance of high performance concrete at airport pavement[J] Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2011, 30 (4): 860-864, 879 (in Chinese).
- [27] 张武满, 陈舒航, 姜慕, 等. 飞机与跑道除冰液对碾压混凝土的影响[C]//2015年第一届固废处理与生态材料学术交流会论文集. 北京: 中国矿业大学, 2015.
ZHANG W M, CHEN S H, XIAN M, et al. Influence of aircraft and airfield deicer on roller compacted concrete[C]// Proceedings of the First Academic Symposium on Solid Waste Treatment and Ecological Materials in 2015. Beijing: China University of Mining & Technology, 2015 (in Chinese).
- [28] 马好霞, 余红发, 吴雅玲, 等. 机场道面抗冻性与冻融介质的相关性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(10): 1642-1649.
MA H X, YU H F, WU Y L, et al. The correlation study between airfield pavement's freezing resistance and freezing-thawing mediums [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(10): 1642-1649 (in Chinese).
- [29] 朱洪波, 闫美珠, 李晨, 等. 图像分析宏观孔隙率对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 275-280.
ZHU H B, YAN M Z, LI C, et al. Analysis of the influence of porosity of macroscopic pore on concrete strength by image method[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 275-280 (in Chinese).
- [30] 刘军, 田悦, 刘智. 低温条件下矿物掺合料对混凝土孔隙率的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 4(23): 597-601.
LIU J, TIAN Y, LIU Z. Study on porosity of low-temperature concrete with mineral admixture[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2007, 4 (23): 597-601 (in Chinese).
- [31] 朱梁. 混凝土孔隙对其宏观力学性能的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
ZHU L. Study on the influence of concrete pore on its macro mechanical properties [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).