

# 橡胶粉掺量和粒径对橡胶混凝土抗冻性能的试验

闻 洋<sup>1</sup>, 贺希茂<sup>1</sup>, 崔 浩<sup>1</sup>, 宋文学<sup>2</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 包头市公路工程股份有限公司, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要** 目的 研究橡胶混凝土在盐冻环境下的抗冻性能,以降低混凝土的孔隙率。方法 以3种橡胶粉粒径与3种掺量为变化参数,对橡胶混凝土和普通混凝土进行快速冻融循环试验,以质量变化率和相对动弹模损失率为评价指标,并用扫描电镜(SEM)对混凝土内部损伤机理进行分析。结果 随着橡胶粉掺量的增加,混凝土质量和动弹性模量都呈现下降趋势,橡胶粉的掺入改善了混凝土的抗冻性能,且300-RC-20-80橡胶混凝土有害及多害孔所占比例为37.97%,相比普通混凝土冻融循环300次后的有害及多害孔少14.27%,橡胶混凝土内部结构更加密实。结论 橡胶混凝土的抗冻性能优于普通混凝土,RC-20-80橡胶混凝土在盐冻环境下的抗冻性能最优。

**关键词** 橡胶混凝土;冻融损伤规律;压汞试验;微观结构;抗冻性

中图分类号 TU533

文献标志码 A

## Effect of Rubber Powder Content and Particle Size on Frost Resistance of Rubber Concrete

WEN Yang<sup>1</sup>, HE Ximao<sup>1</sup>, CUI Hao<sup>1</sup>, SONG Wenxue<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010;

2. Baotou Highway Engineering Company, Ltd., Baotou, China, 014010)

**Abstract:** The frost resistance of rubber concrete in salt-freezing environment was studied in order to reduce the porosity of the concrete. Three kinds of rubber powder particle size and three kinds of content were used as the change parameters. And the rubber concrete and ordinary concrete were subjected to rapid freeze-thaw cycle tests. Rate of quality change and relative dynamic elastic modulus loss rate taken as evaluation indicators, and with the help of scanning electron microscope (SEM) observation, the internal damage mechanism of concrete is studied and analyzed. The test results show that with the increase of the rubber powder content, the concrete quality and dynamic elastic modulus both show a downward trend, but the rubber powder blending improves the frost resistance of the concrete, and 300-RC-20-80 rubber concrete is harmful and has harmful pores

收稿日期:2021-05-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51768056);内蒙古自治区自然科学基金项目(2019MS05038)

作者简介:闻洋(1976—),男,教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构方面研究。

with the proportion 37.97% , which is 14.27% less harmful and harmful holes than that of ordinary concrete with 300 freeze-thaw cycles. So the frost resistance of rubber concrete is better than that of ordinary concrete. RC-20-80 rubber concrete has the best frost resistance under salt-freezing environment.

**Key words:** rubber concrete; freeze-thaw damage law; mercury intrusion test; microstructure; freeze resistance

废旧橡胶在自然环境下很难降解,将废旧橡胶用于制备橡胶混凝土是一种有效的处理方法。橡胶混凝土与普通混凝土相比,具有质量轻、韧性好、延性好、抗冻性好、降噪隔音、耐磨减震好等优点而被广泛应用到道路工程领域<sup>[1-4]</sup>。目前国内外的研究多聚焦在掺加橡胶粉后混凝土耐久性诸如冻融、渗透、硫酸盐侵蚀、碳化、碱骨料反应等的单一因素研究。张立群等<sup>[5]</sup>研究了橡胶混凝土抗渗性能,橡胶掺量在12%以下时能有效改善混凝土的抗氯离子渗透性能。王开惠等<sup>[6]</sup>研究了橡胶混凝土抗盐侵蚀性能,无论水灰比还是强度等级相同,橡胶混凝土抗盐侵蚀能力均随橡胶掺量的增加而增大。葛文慧<sup>[7]</sup>使用橡胶等体积取代了5%的砂子混凝土抗冻性能最好。我国北方土壤中富含硫酸盐,在硫酸盐和冻融耦合条件下,对混凝土的破坏较单一条件更加严重,目前对掺加精加工的细胶粉凝土耦合作用下的耐久性能研究较少。基于此,笔者研究掺加不同粒径、不同掺量细胶粉混凝土在硫酸盐侵蚀及冻融循环耦合作用下抗冻性能的变化,并结合扫描电镜(SEM)对内部水化产物进行分析,为橡胶混凝土在北方地区应用提供可靠依据。

1 试验

1.1 试验材料和配合比

水泥选用包头蒙西厂出产的普通硅酸盐P·O 42.5水泥,其性能指标如表1所示。细骨料采用普通天然河砂,其细度模数为2.80,粗骨料采用粒径在5~25 mm连续级配均匀的碎石,压碎值3.54%。橡胶选用

0.425 mm、0.18 mm、0.125 mm 粒径橡胶粉,各粒径橡胶粉的表观密度为1 170 kg/m<sup>3</sup>,橡胶粉颗粒均匀。

表1 水泥物理性能

Table 1 Physical properties of cement					
标准稠 度用水 量/%	80 μm 细 度/%	抗折强度/ MPa		抗压强度/ MPa	
		3 d	28 d	3 d	28 d
25.9	4.3	6.1	9.1	25.2	45.5

混凝土配合比如表2所示,其中CJ为普通混凝土,RC为橡胶混凝土。

表2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of concrete					
编号	掺量/(kg·m <sup>-3</sup> )				
	水泥	砂	石子	水	橡胶粉
CJ	440	835	980	175	0
RC-10-40	440	825	980	175	10
RC-20-40	440	815	980	175	20
RC-30-40	440	805	980	175	30
RC-10-80	440	825	980	175	10
RC-20-80	440	815	980	175	20
RC-30-80	440	805	980	175	30
RC-10-120	440	825	980	175	10
RC-20-120	440	815	980	175	20
RC-30-120	440	805	980	175	30

基准混凝土设计强度等级为C40,将0.425 mm、0.18 mm、0.125 mm 粒径的橡胶分别以10、20、30 kg/m<sup>3</sup>等质量方式取代细骨料,橡胶粉的掺入会对混凝土工作性能产生不利影响,因此在橡胶混凝土的配制过程中需根据实际情况适量增加减水剂,减水剂用量为水泥的0.8%。

1.2 试验方法及设备

试验浇筑长宽高为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件,将成型后的试件标准养护 24 d 后放入质量分数为 5% 的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中,浸泡 4 d 后取出测量初始质量和初始动弹性模量。将测量好的试件继续放入装有 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液的橡胶桶内,并依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T50082—2009) 进行快速冻融循环试验。每隔 25 次冻融循环后将试件取出,测试试件的相对质量损失和动弹性模量。切取橡胶混凝土与集料交界的部分,通过扫描电镜(SEM)观察界面及侵蚀产物情况,分析研究其微观形貌对抗冻性能的影响,从微观上解释橡胶粉提高混凝土抗冻性能的作用机理。

2 结果与分析

2.1 抗压强度试验结果及分析

橡胶混凝土强度变化曲线如图 1 所示。橡胶混凝土在受压时,首先在试件边缘出现竖向裂缝,随着加载至极限荷载,边缘形成多

条细小裂缝,破坏模式呈明显的塑性破坏,且橡胶集料掺量的越多,混凝土产生塑性变形幅度越大。随着橡胶掺量的增加,抗压强度随之下降,掺量为 30 kg/m<sup>3</sup> 时,0.425 mm、0.18 mm、0.125 mm 粒径的抗压强度分别为 34.65 MPa、31.48 MPa、29.39 MPa,分别下降为基准试件的 82.3%、74.7%、69.8%。

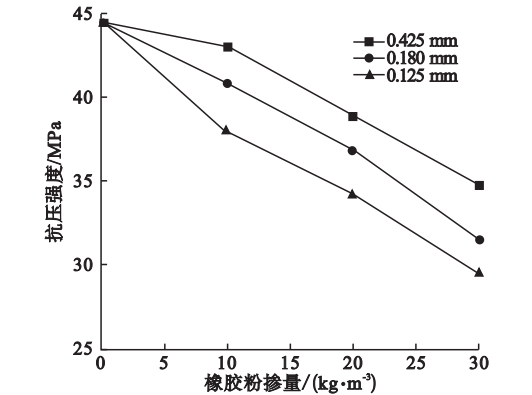


图 1 橡胶掺量对混凝土抗压强度的影响

Fig. 1 Influence of rubber content on compressive strength of concrete

2.2 冻融循环试验结果及分析

橡胶混凝土冻融循环后质量损失率变化如图 2 所示。

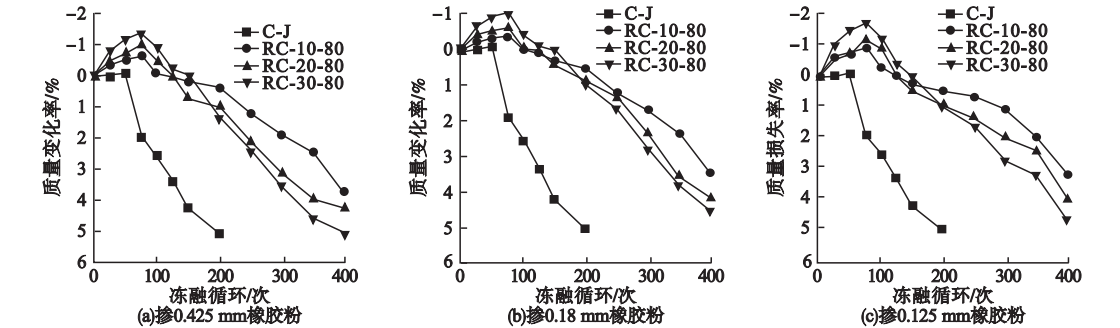


图 2 橡胶混凝土冻融循环后质量损失率

Fig. 2 Mass loss rate of rubber concrete after freeze-thaw cycles

从图 2 可知,橡胶混凝土试件的最大质量损失率是 4.86%,未达到规范规定的 5%,显然掺加 20 kg/m<sup>3</sup> 质量损失率最小对应 0.425 mm、0.18 mm、0.125 mm 分别为 3.71%、3.21%、3.46%。3 种橡胶混凝土在盐溶液中质量的损失率变化趋势相似,都是呈现先升后降的趋势,即橡胶混凝土的质量

先增加后降低,原因是在冻融循环初期橡胶混凝土内部的冻胀收缩应力较小,部分内部空隙由橡胶颗粒以及渗入的硫酸镁填充,从而橡胶混凝土对外表现为质量增加的现象。在 50 次冻融循环后,普通混凝土试件质量急剧损失,质量变化曲线上出现明显的“拐点”,表明试件以此点为分界线开始出现劣

化。橡胶混凝土的拐点均出现在100次循环后,比普通混凝土推迟了50%,这是因为在混凝土中加入橡胶后微孔隙增加,且冻融初期橡胶混凝土中离子浓度较低,参照游离平衡原理<sup>[8]</sup>,盐溶液中的 $\text{SO}_4^{2-}$ 离子会由溶度高的部分移动至溶度低的部分,游离的离子与混凝土发生反应产生新的物质,因此橡胶混凝土的质量增加明显高于普通混凝土且“拐点”出现的时间后移。在“拐点”出现的后期,试件质量下降速度越来越快,主要是由于硫酸盐溶液侵蚀的深入,使混凝土发生膨胀,形成贯穿裂缝,导致混凝土试件表面水泥浆体与骨料剥落,质量减少。

橡胶混凝土在硫酸钠溶液中冻融循环作用下的相对动弹性模量变化规律如图3所示。从图可知,各试件的相对动弹性模量均是随着冻融循环次数的增加而不断减小,且变化呈现快速下降、缓慢下降、迅速下降3个

阶段。对普通混凝土而言,橡胶粉的加入明显改善了其抗冻融循环的性能,冻融循环次数由150次增加到250次,单冻融循环次数就提升了67%,且动弹性模量的下降率从28%变化到2.8%。掺加0.18 mm的橡胶混凝土相对动弹性模量下降速度较掺0.425 mm、0.125 mm的混凝土缓慢,抗冻性能更佳,因为普通混凝土孔隙内部被浸入了硫酸镁溶液,形成结晶压和结冰压<sup>[9-14]</sup>而冻胀破坏,而橡胶混凝土中由于冻胀作用而产生的孔隙被水化产物与硫酸盐反应生成的钙矾石以及橡胶颗粒填充,且这些孔隙在冻融循环后期会被生成的小部分石膏会进一步填充,阻止其内部裂纹的生成、延升和贯通,提高其抗冻性能,而0.18 mm橡胶粒径相对较大,因此动弹性模量的变化趋于平稳,较0.425 mm、0.125 mm抗冻性能更佳。

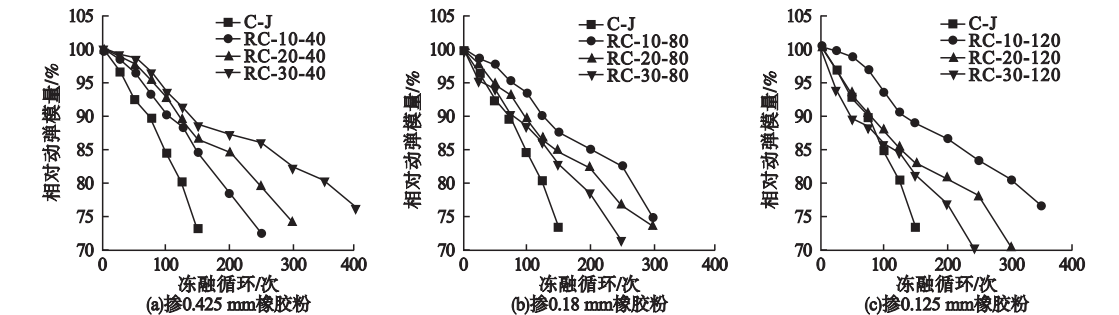


图3 橡胶混凝土冻融循环后相对动弹性模量变化率

Fig. 3

Change rate of relative dynamic elastic modulus of rubber concrete after freeze-thaw cycle

2.3 压汞试验结果及分析

次冻融循环试验后压汞测试结果。

表3 为掺0.18 mm 橡胶粉的混凝土 300

表3 橡胶混凝土 300 次冻融循环试验后压汞测试结果

试件编号	孔径比例/%				最可几孔径/ nm	平均孔径/ nm	比孔容/ (mL·g <sup>-1</sup> )	总孔隙率/ %
	≤20	20~50	50~200	>200				
	nm	nm	nm	nm				
C-J	17.97	31.36	15.97	34.7	86	28.4	0.06	6.43
RC-10-80	30.22	24.08	14.26	31.44	90	40.8	0.08	6.01
RC-20-80	31.61	27.49	11.23	29.67	98	43.8	0.09	5.73
RC-30-80	29.97	25.23	14.47	30.33	112	59.8	0.18	5.94
300-C-J	23.97	23.79	16.5	35.74	102	30.2	0.09	7.01
300-RC-10-80	27.46	22.45	16.25	33.48	114	60.8	0.12	6.28
300-RC-20-80	33.81	28.22	11.61	26.36	138	68.5	0.14	6.12
300-RC-30-80	28.22	28.13	13.53	30.12	186	70.3	0.13	6.12

吴中伟<sup>[14]</sup> 根据孔径大小将混凝土内部孔隙分为:孔隙 < 20 nm 为无害孔、孔隙 = 20 ~ 50 nm 为少害孔、孔隙 = 50 ~ 200 nm 为有害孔、孔隙 > 200 nm 为多害孔 4 类孔隙。从表 3 可知,掺入橡胶粉后最可几孔径的大体趋势是向大孔发展。图 4 为掺 0.18 mm 橡胶

粉的混凝土孔隙特征。从图中可以看出,曲线呈现整体右移的趋势,孔隙率不断增大,混凝土内部的损伤逐渐加剧,同时可以看出橡胶混凝土曲线一直处于普通混凝土的下侧,随着普通混凝土的大孔径孔隙数量不断增加,抗冻性能也逐渐劣于橡胶混凝土。

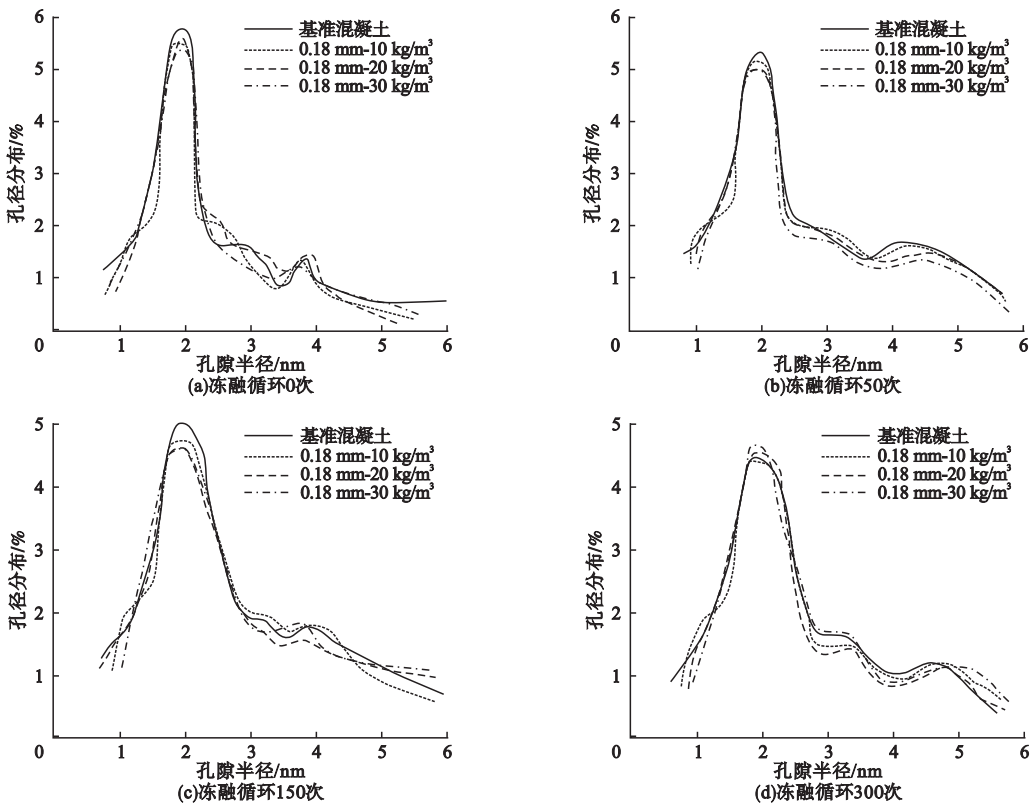


图 4 橡胶混凝土孔隙特征

Fig. 4 Pore characteristics of rubber concrete

根据混凝土内部孔隙 4 类孔隙,由压汞试验结果可知,冻融循环试验前 RC-20-80 组橡胶混凝土中无害及少害孔所占比例为 59.1%,相比普通混凝土 C-J 的 49.33 高了 9.77%;冻融循环后,300-RC-20-80 橡胶混凝土有害及多害孔所占比例为 37.97%,相比普通混凝土冻融循环 300 次后的有害及多害孔少 14.27%。由此可见,加入适量的橡胶粉可以提高混凝土内部小孔所占的比例,提高混凝土的密实度,有害离子及水分进入混凝土内部变得更加困难,相应的冻胀力减少,因此橡胶混凝土的抗冻能力优于普通混

凝土。

2.4 扫描电镜试验结果及分析

图 5 为经冻融循环的橡胶混凝土试样的微观形貌图。从图 5(a)可知,大量絮状水化硅酸钙凝胶的存在,这表示未受硫酸盐侵蚀与冻融破坏的混凝土结构较完整密实,另外因为混凝土存在初始损伤,所以在微观下可见少许微裂纹的存在,这对抵抗硫酸盐侵蚀和冻融循环的破坏都是不利的。从图 5(b)可知,水泥与骨料界面存在少量针状钙矾石晶体。在冻融循环初期,渗入到混凝土中的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子浓度较低,形成的钙矾石晶体结晶



不良且数量较少。钙矾石的形成对冻融循环前期的混凝土是有利的,因为混凝土中的孔隙被钙矾石填充而变得更加密实,因此橡胶混凝土在冻融循环初期相对动弹性模量下降缓慢。但是随着冻融循环和硫酸盐侵蚀的加剧,钙矾石结晶量增加,反而促进了裂纹的形成与发展,这是由于冻融循环使得混凝土中的裂缝增多变大, $\text{SO}_4^{2-}$  离子逐渐渗入到混凝土的内部,氢氧化钙和水化铝酸钙与渗入的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子发生反应生成水化硫铝酸钙和石膏,导致体积膨胀,从而加快了混凝土的破坏。从图 5(c) 可知,随着冻融循环的进行,

当冻融循环次数达到 200 次时,侵蚀产物在混凝土的内部不断生成,大量“钙矾石”转化成单硫型水化产物填补在混凝土的孔隙中,使得混凝土更易受到硫酸盐的侵蚀。当冻融循环次数增加至 300 次时,在冻融破坏与硫酸盐侵蚀共同作用下混凝土劣化加剧,通过微裂缝持续渗入孔隙内的  $\text{SO}_4^{2-}$  离子浓度进一步增大,并有少量的石膏晶体生成,同时伴有裂缝出现,图 5(d) 为橡胶与水泥石之间的裂缝,随着冻融破坏与硫酸盐侵蚀加剧,混凝土内部裂缝扩展和增多,孔隙处裂缝联通,混凝土结构明显疏松。

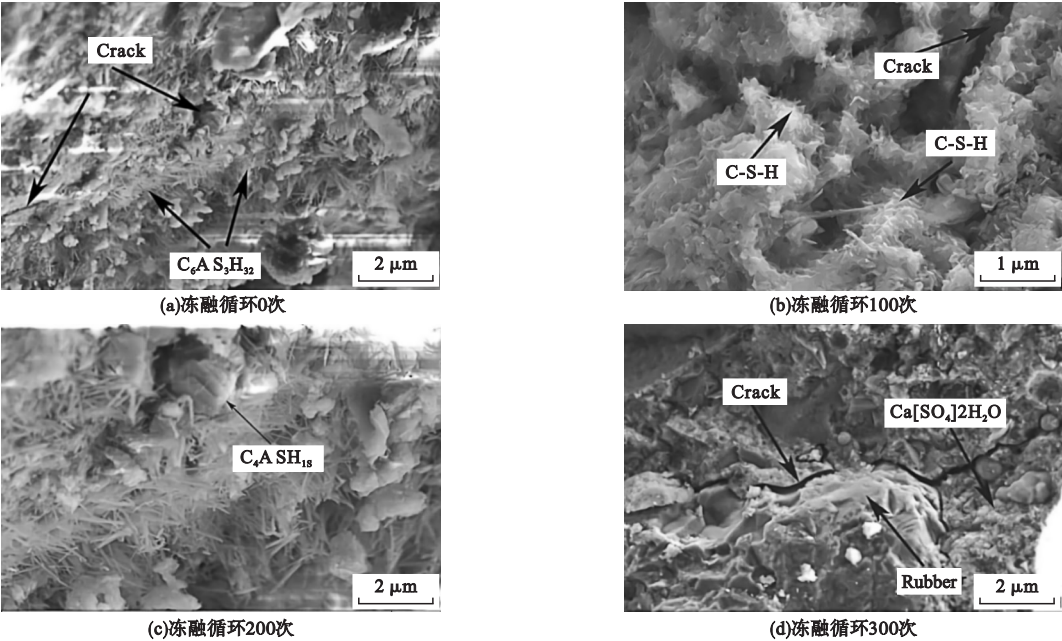


图 5 冻融循环后橡胶混凝土微观形貌

Fig. 5 Microscopic morphology of rubber concrete after freeze-thaw cycles

3 结 论

- (1) 适当橡胶粉的掺入可减缓混凝土试件的质量损失,随橡胶掺量的增加,混凝土盐冻循环后的质量损失越大,随橡胶粒径的减小质量损失也越严重。硫酸盐对冻融循环既有促进作用又有抑制作用,因此试件质量出现先上升后下降。
- (2) 掺入过细的橡胶粉对混凝土的抗冻性能不利,盐冻循环后的混凝土相对动弹性

- 模量呈现先下降,而后平稳,最后又下降的趋势。
- (3) 橡胶混凝土在硫酸盐溶液中冻融循环后生成针状钙矾石晶体,填充于混凝土内部产生的微裂缝,橡胶有助于降低混凝土的孔隙率、提高其对有害离子及水的渗透能力。
- (4) RC-20-80 橡胶混凝土有害及多害孔所占比例为 37.97%,相比普通混凝土冻融循环 300 次后的有害及多害孔少约 14.27%,橡胶混凝土内部结构更加密实,橡

胶混凝土的抗冻能力优于普通混凝土。橡胶掺量为  $20 \text{ kg/m}^3$ 、粒径为  $0.18 \text{ mm}$  时,混凝土的抗冻性能最优。

## 参考文献

- [1] 胡彪,张晓雨,赵新,等.废旧橡胶制品资源化利用研究进展[J].材料导报,2014,28(3):75-79.  
(HU Biao,ZHANG Xiaoyu,ZHAO Xin,et al. Research progress on resource utilization of waste rubber products [J]. Materials review, 2014,28(3):75-79.)
- [2] GANJIAN A E,KHOAMI M,MAGHSOUD A A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete [J]. Construction & building materials,2009,23(5):1828-1836.
- [3] 薛刚,孙立所,许胜,等.橡胶混凝土抗压性能及细观破坏机理研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(6):1082-1090.  
(XUE Gang,SUN Lisuo,XU Sheng,et al. Study on compressive properties and meso failure mechanisms of rubber concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science edition),2020,36(6):1082-1090.)
- [4] 路沙沙,麻凤海,邓飞.橡胶颗粒掺量、粒径影响橡胶混凝土性能的试验分析[J].硅酸盐通报,2014,33(10):2477-2483.  
(LU Shasha, MA Fenghai, DENG Fei. Experimental analysis of crumb rubber concrete performance caused by content and grain diameter of rubber [J]. Bulletin of the Chinese ceramics society,2014,33(10):2477-2483.)
- [5] 张立群,张晓冉,张静轩,等.改性橡胶骨料混凝土的抗氯离子渗透性能及抗冲击性能研究[J].混凝土与水泥制品,2019(3):10-13.  
(ZHANG Liqun,ZHANG Xiaoran,ZHANG Jingxuan,et al. Study on resistance to chloride ion penetration and shock resistance of modified rubber aggregate concrete [J]. China concrete and cement products, 2019(3):10-13.)
- [6] 王开惠,朱涵,祝发珠.氯盐侵蚀环境下橡胶集料混凝土的力学性能研究[J].长沙交通学院学报,2006,22(4):38-42.  
(WANG Kaihui,ZHU Han,ZHU Fazhu. Investigation on mechanics performance of crumb rubber concrete under chlorine salt erosion [J]. Journal of Changsha communications university, 2006, 22(4):38-42.)
- [7] 葛文慧.废弃橡胶混凝土的力学性能和断裂韧性及抗冻性能[J].合成橡胶工业,2019,42(6):474-478.  
(GE Wenhui. Mechanical properties, fracture toughness and frost resistance of waste rubber concrete [J]. China synthetic rubber industry, 2019,42(6):474-478.)
- [8] 杨全兵.冻融循环条件下氯化钠浓度对混凝土内部饱水度的影响[J].硅酸盐学报,2007(1):96-100.  
(YANG Quanbing. Effect of sodium chloride concentration on saturation degree in concrete under freezing-thawing cycles [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2007(1):96-100.)
- [9] 姚贤华,冯忠居,王富春,等.复合盐浸下多元外掺剂-混凝土抗干湿-冻融循环性能[J].复合材料学报,2018,35(3):690-698.  
(YAO Xianhua,FENG Zhongju,WANG Fuchun,et al. Property of multiple admixture-concrete in multi-salt soaking under wetting-drying freezing-thawing cycles [J]. Journal of composite materials,2018,35(3):690-698.)
- [10] 孙伟.现代结构混凝土耐久性评价与寿命预测[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.  
(SUN Wei. Durability evaluation and life prediction of modern structural concrete [M]. Beijing:China Building Industry Press,2015.)
- [11] 申向东,张玉佩,王丽萍.混凝土预制板衬砌梯形断面渠道的冻胀破坏受力分析[J].农业工程学报,2012,28(16):80-85.  
(SHEN Xiangdong,ZHANG Yupei,WANG Liping. Stress analysis of frost heave for precast concrete panel lining trapezoidal cross-section channel [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2012, 28(16):80-85.)
- [12] TYROLOGOU P, DUDENEYA W, GRATTON I C A. Evolution of porosity in geotechnical composites [J]. Magnetic resonance imaging,2005,23(6):765-768.
- [13] 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 Hongfa,SUN Wei,MA Haiyan,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.)
- [14] 吴中伟.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.  
(WU Zhongwei. High performance concrete [M]. Beijing: China Railway Publishing House,1999.)  
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)