

# 基于复合交变冻融环境下橡胶混凝土 的性能分析

闻洋<sup>1</sup>, 崔浩<sup>2</sup>, 薛刚<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 北京五合国际工程设计顾问有限公司, 北京 100097)

**摘要** 目的 研究橡胶混凝土在盐冻环境作用下的抗冻耐久性并分析冻融后橡胶混凝土的抗弯强度变化, 为完善橡胶混凝土抗冻耐久性. 方法 采取三种不同粒径、三种不同掺量的橡胶粉等体积取代细骨料砂制作橡胶混凝土试件, 对其进行质量分数为 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  溶液侵蚀下的冻融循环试验. 结果 试验结果表明, 随着橡胶掺量的不断增加, 橡胶混凝土的相对动弹性模量、抗冻性和抗弯强度都会不断下降. 掺量 10%、粒径 0.18 mm 的橡胶混凝土相对动弹性模量降低最少, 100 次冻融循环后降至 96.1%, 且高于基准混凝土的 92.8%. 掺量 30%、粒径 0.38 mm 的橡胶混凝土相对动弹性模量降低最多, 降至 85%. 在抗弯方面, 100 次冻融循环后基准混凝土的抗弯强度最高, 为 3.77 MPa, 降幅 5.51%. 橡胶混凝土中, 掺量 10%、粒径 0.25 mm 的混凝土强度最高, 强度为 3.55 MPa, 降幅 10.17%. 结论 掺入橡胶粉能改善混凝土的抗冻性, 但是会降低混凝土的抗弯强度, 橡胶混凝土的抗硫酸盐冻融性能和抗弯强度的最佳取代率为 10%.

**关键词** 橡胶混凝土; 冻融循环; 耐久性; 抗弯强度

中图分类号 TU502.6 文献标志码 A

## Study on Durability of Rubber Concrete Based on the Coupling Effects of Sulfate Erosion and Freeze-Thaw Cycling

WEN Yang<sup>1</sup>, CUI Hao<sup>2</sup>, XUE Gang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010;  
2. Beijing Werkhart International Design and Engineering Consulting Ltd, Beijing, China, 100097)

**Abstract:** In order to improve the frost-resistant durability of rubber concrete, the frost resistance durability and flexural strength of rubber concrete under salt-frozen environment are studied in this paper. Rubber concrete specimens, made by mixing rubber with three types of grain size and three

收稿日期: 2018-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51768056, 51868063); 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, 主要从事组合结构和混凝土材料方面研究.

contents to replace the fine aggregate in the Portland cement concrete, were used for freeze-thaw cycle test under the erosion of 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  solution. The test results show that the relative dynamic elasticity modulus, frost-resistance and flexural strength decrease with the increasing rubber content. The relative dynamic elastic modulus of rubber concrete was reduced the least by the rubber concrete with 10% ,0.18 mm, and it was decreased to 96.1% after 100 freeze-thaw cycles, which was higher than 92.8% of the reference concrete. The relative dynamic elastic modulus of rubber concrete decreases with the addition of 30% ,0.38 mm, and it fell to 85%. In bending aspect, after 100 freeze-thaw cycles, the flexural strength of the reference concrete is the highest, 3.77 MPa, a decrease of 5.51%. The strength of rubber concrete with 10% ,0.25 mm is the highest, and the strength is 3.55 MPa, a drop of 10.17%. The addition of rubber powder can improve the frost resistance of this concrete, however, the flexural strength of concrete will be reduced. The optimum substitution ratio of rubber concrete for the resistance to sulfate solution freeze-thawing and the flexural strength after the freeze-thaw cycle circulations is 10%.

**Key words:** rubber concrete; freeze-thaw cycles; durability; flexure strength

抗冻性是混凝土耐久性的重要指标之一,对寒冷地区混凝土结构和构件的寿命具有一定影响<sup>[1]</sup>.在我国北方地区天气寒冷,水和土壤中含有多种硫酸盐,混凝土在经历冻融循环作用的同时又受到多种硫酸盐的侵蚀破坏,其破坏程度较单一因素作用下的破坏更为严重,影响混凝土结构的耐久性.因此研究硫酸盐侵蚀与冻融循环两种因素共同作用下混凝土的损伤机理有着重要的理论意义与工程实际意义<sup>[2-3]</sup>.

橡胶混凝土是以普通混凝土为基材,掺入橡胶粉配制而成的水泥基复合材料,橡胶粉的掺入不改变水泥混凝土中各种材料的化学性能,而是通过物理作用改善混凝土的内部结构<sup>[4-5]</sup>.橡胶混凝土具有抗冲击性能好和抗收缩开裂能力强等优点<sup>[6-8]</sup>,但其抗压强度和抗拉强度却明显下降<sup>[9-10]</sup>.

目前,国内外学者已经对一些对新型砂浆和混凝土的抗冻性能进行了部分研究<sup>[11-12]</sup>,同时,关于橡胶混凝土抗冻性能方面的研究也取得了不少优秀成果. K. A. Paine<sup>[13]</sup>等将破碎的橡胶作为引气剂掺入到混凝土中,研究混凝土的抗冻性,结果表明:橡胶粉的掺入在一定程度上可以改善混凝土的抗冻性能; B. Z. Savas<sup>[14]</sup>等研究不同掺量的橡胶颗粒对混凝土试件进行冻融试验研究

其抗冻性,其中橡胶掺量分别为水泥质量的10%、15%、20%和30%.试验结果表明,当冻融循环次数为300次时,掺量为水泥质量10%和15%的橡胶混凝土的耐久性系数比普通混凝土增加60%.陈波等<sup>[15]</sup>通过试验对比了橡胶混凝土和引气混凝土的抗冻性能.研究发现:当橡胶掺量小于10%时,混凝土试件的抗冻性得到了显著的改善,而此时掺入粒径为0.14 mm的橡胶混凝土比普通混凝土的抗冻性能好,当粒径在3~4 mm时,橡胶混凝土与引气混凝土的抗冻性能类似.该学者在研究中指出橡胶粉在一定程度上可以代替引气剂加入混凝土中来改善混凝土的抗冻性.李光宇<sup>[16]</sup>研究证明,胶粉可以充当固体引气剂掺入到混凝土中,橡胶混凝土的抗冻性能良好;李清海等<sup>[17]</sup>通过对不同橡胶掺量的混凝土进行快速冻融试验,分析其抗冻性能,认为橡胶混凝土的质量损失随着冻融循环次数增加的变化趋势与普通混凝土一致,相对动弹性模量亦是如此,且认为橡胶掺量为30%时对混凝土的抗冻性最有利.许金余等<sup>[18]</sup>用3种粒径:1 mm、0.83 mm、0.38 mm,4种掺量:50 L/m<sup>3</sup>、75 L/m<sup>3</sup>、100 L/m<sup>3</sup>、125 L/m<sup>3</sup>的橡胶粉,设计了12种配合比的橡胶混凝土,对比分析橡胶混凝土的抗冻性.结果表明,质量损失率随着橡胶粉

掺量的逐渐增加,呈现先减小后增大的趋势,而相对动弹性模量则与之相反,是先增大后减小,因此,当橡胶混凝土选用 0.38 mm 橡胶粉,掺量应小于  $100 \text{ L/m}^3$  时,更有利于抗冻性的提高。

国内外学者在混凝土抗冻耐久性方面研究多集中于单一耐久性因素的作用,而对于两种或两种因素以上的耦合作用下的抗冻耐久性研究很少<sup>[19-20]</sup>,而对橡胶混凝土在两种因素耦合作用下的抗冻融循环的研究更是罕见。基于此,笔者对不同橡胶掺量、不同橡胶粒径的混凝土在硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下的抗冻耐久性及其经历不同次数冻融循环后的抗弯强度进行研究,探讨橡胶掺量和橡胶粒径对混凝土抗硫酸盐冻融性能的

影响规律,得到最优的橡胶掺量和橡胶粒径,为后续橡胶混凝土耐久性研究提供理论依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试验原材料

试验所需材料:水泥采用包头市蒙西水泥有限责任公司生产的 P·O 42.5,其基本物理性能如表 1 所示。细骨料为普通中砂,表观密度  $2\ 658 \text{ kg/m}^3$ ;粗骨料采用碎石,级配合格,表观密度  $2\ 734 \text{ kg/m}^3$ ;橡胶粉为四川金摩尔环保新材料有限责任公司生产的橡胶粉;浸泡溶液为普通自来水与无水硫酸钠粉末配置的 5% 溶液;采用聚羧酸高效减水剂,减水率为 20%;水为普通自来水。

表 1 水泥物理性能指标

Table 1 Physical properties of cement

密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	标准稠度用水量/%	细度/%	安定性	凝结时间/h	
				初凝	终凝
2.9	25	6	合格	2	4

### 1.2 橡胶混凝土配合比设计

基准混凝土强度为 C40,采用橡胶粉等体积取代细骨料的方法制备橡胶混凝土。橡

胶粉的粒径采用 0.38 mm、0.25 mm、0.18 mm,分别等体积取代砂子的 10%、20%、30% 掺入到混凝土中。具体配合比见表 2。

表 2 橡胶混凝土配合比

Table 2 Mix proportion of rubber concrete

试件编号	水泥用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	砂用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	石子用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	水用量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	橡胶掺量/%
CC	440	835	980	175	0
RC-10-0.38	440	797	980	175	10
RC-20-0.38	440	760	980	175	20
RC-30-0.38	440	722	980	175	30
RC-10-0.25	440	797	980	175	10
RC-20-0.25	440	760	980	175	20
RC-30-0.25	440	722	980	175	30
RC-10-0.18	440	797	980	175	10
RC-10-0.18	440	760	980	175	20
RC-30-0.18	440	722	980	175	30

注:CC 表示基准混凝土;RC-m-n 中,RC 表示橡胶混凝土,m 表示橡胶粉等体积取代砂的比率,n 表示所掺橡胶粉的粒径。

### 1.3 试验方法

试验参照《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T50082—2009)中的快冻法进行,试件的长宽高为100 mm × 100 mm × 400 mm,将成型后的试块放入标准养护室24 d后取出,将其浸泡于温度为20 ℃左右的质量分数为5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中,液面高于试件顶面20 mm左右,浸泡4 d后取出试件,将其放入冻融机中进行冻融循环试验.冻融机型号为北京数智意隆仪器有限公司生产的KDR-V9型冻融试验机.动弹性模量测定仪型号为天津市港源试验仪器厂生产的DT-20型.压力试验机的型号为TYE-2000B型压力试验机.

试验步骤:①将各组试件放入长宽高为110 mm × 110 mm × 500 mm的黑色橡胶盒内,倒入质量分数为5%的Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液没过试件表面,将橡胶盒放入冻融机内;②每次冻融循环应在2~4 h内完成.在冷冻和融化的周期过程中,试件中心最低温度应控制在(-18 ± 2) ℃,最高温度控制在(5 ± 2) ℃;③每隔25次冻融循环测量抗折试件的质量和相对动弹性模量,并测量冻融循环0次、25次、50次和100次后的试件的抗弯强度.

相对动弹性模量的测量:将已测量试件尺寸和质量的试件放于20 mm厚的泡沫塑料垫上,使试件成型面向上,使动弹性模量测定仪的发射端与接收端的测杆位于试件长边的中心线上,其中接收端的测杆放置于距离试件边缘5 mm处.每一点重复测量两次以上,两次连续测值之差不超过两个测值的算术平均值的0.5%时,应取这两个测值的算术平均值作为该试件的基频振动频率.图1为弹性模量测量现场试验图.

相对动弹性模量计算公式:

$$P_i = \frac{f_{Ni}^2}{f_{O_i}^2} \times 100. \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为经 $N$ 次冻融循环后第 $i$ 个混凝土试件的相对动弹性模量,% ,精确至0.1; $f_{Ni}^2$

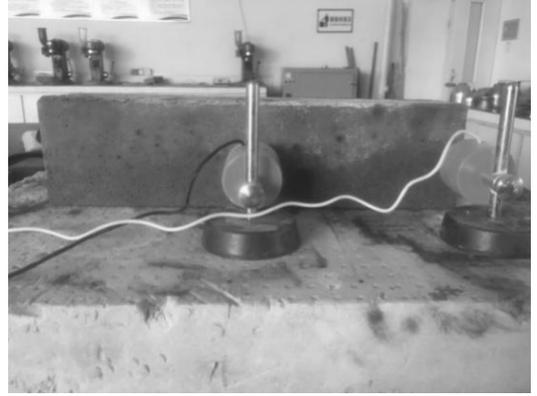


图1 弹性模量测量

Fig. 1 Measurement of elastic modulus

为经 $N$ 次冻融循环后第 $i$ 个混凝土试件的横向基频,Hz; $f_{O_i}^2$ 为冻融循环试验前第 $i$ 个混凝土试件的横向基频,Hz.

$$P = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 P_i. \quad (2)$$

式中: $P$ 为经 $N$ 次冻融循环后一组混凝土试件的相对动弹性模量,% .相对动弹性模量的测定值为三个试件试验结果的平均值.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土质量损失率

橡胶混凝土在质量分数为5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中经不同次数冻融循环后的质量损失率如表3所示.

表3 试件冻融循环后的质量损失率

Table 3 Mass loss rate after the freeze-thaw cycles

试件编号	质量损失率/%				
	0次	25次	50次	75次	100次
CC	0	-0.12	0.07	0.01	-0.07
RC-10-0.38	0	-0.38	-0.48	-0.68	-0.76
RC-20-0.38	0	-0.49	-0.71	-0.98	-0.88
RC-30-0.38	0	-0.80	-1.17	-1.13	-1.05
RC-10-0.25	0	-0.28	-0.39	-0.59	-0.82
RC-20-0.25	0	-0.40	-0.63	-0.82	-0.94
RC-30-0.25	0	-0.69	-0.93	-1.09	-1.18
RC-10-0.18	0	-0.53	-0.79	-1.00	-0.99
RC-20-0.18	0	-0.55	-0.78	-0.89	-1.02
RC-30-0.18	0	-1.05	-1.55	-1.70	-1.77

质量损失率是混凝土在冻融和腐蚀作用下表面剥落情况的评价指标,反映混凝土表面受到损伤的程度.在硫酸盐侵蚀与冻融循环两种因素共同作用下,影响混凝土质量变化的原因主要有两部分:一部分是由于硫酸盐侵蚀和冻融破坏共同作用,导致混凝土表面的浆体及骨料剥落,从而混凝土的质量降

低;另一部分则是在冻融循环过程中,硫酸盐溶液渗入混凝土内部,导致硫酸盐结晶和膨胀性产物的产生,混凝土质量在一定程度上呈现增长的趋势.图2分别为冻融循环0次、50次和100次后,RC-30-0.38的试件表面损伤情况.

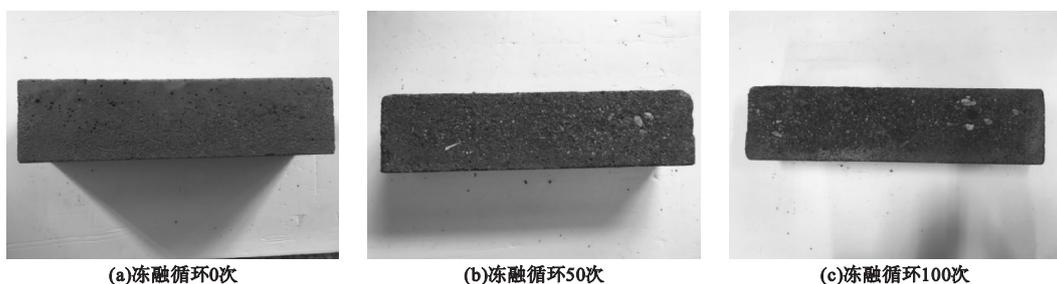


图2 RC-30-0.38冻融循环后试件表面损伤图

Fig. 2 Surface damage after freeze-thaw cycles

由表3可知,除基准混凝土外,橡胶混凝土的质量损失率在0~100次冻融循环期间均为负值,这表示橡胶混凝土的质量一直处于一个增长的状态且增长幅度均高于基准混凝土.在冻融循环期间,随着橡胶掺量的增加,试件的质量增长越大.掺量10%、0.38 mm的橡胶混凝土质量增长最小,质量损失率为-0.76%;掺量30%、0.18 mm的橡胶混凝土质量增长最大,质量损失率为-1.77%.这种现象说明在100次冻融循环期间内,一方面,橡胶粉的掺入降低了混凝土的质量损失率,橡胶混凝土相对于普通混凝土受到冻融破坏和硫酸盐侵蚀作用较小,混凝土表面剥蚀不明显,但冻融后试件表面所形成的大量微裂缝导致盐溶的渗入,从而出现质量持续增长的现象;另一方面,由于橡胶粉与水泥石界面之间的粘结性差,水泥石的整体性和强度被破坏,试件内部出现微裂缝,溶液渗入到混凝土内部,从而导致随着橡胶掺量的增加,冻融循环后混凝土的质量增长越大.

在掺量相同的情况下,在前75次冻融循环期间,粒径0.25 mm的混凝土质量增长最

小,0.38 mm次之,0.18 mm质量增长最大,但是在100次冻融循环后,出现随着粒径的减小质量增长越大的现象.例如75次冻融循环后RC-20-0.38、RC-20-0.25和RC-10-0.18的质量损失率分别为-0.98%、-0.82%和-0.89%,而100次冻融循环后其质量损失率分别为-0.88%、-0.94%和-1.02%.出现这种情况是因为粒径0.38 mm的橡胶混凝土在75次冻融循环后质量损失率已经出现了拐点,向着质量减小的方向发展.分析其原因可能因为粒径更小的橡胶粉引入了更多的气泡,提高了混凝土的抗冻性,减小混凝土的质量损失.所以,掺入粒径较小的橡胶粉的混凝土的抗冻性能更好,即本试验中0.18 mm的橡胶混凝土的抗冻性能最佳.

由图2可知,橡胶混凝土试件表面的损伤程度随着冻融循环次数的增加而加重,细骨料逐渐剥落,粗骨料逐渐显露出来.但随着冻融循环的进行,试件表面及内部逐渐产生微裂缝,这些微裂缝导致盐溶液的渗入,从而出现橡胶混凝土的质量增长的趋势.

## 2.2 混凝土相对动弹性模量的变化

相对动弹性模量是反映混凝土内部微裂

缝开展情况的参数.分析橡胶混凝土的相对动弹性模量变化,可以得知其经历冻融循环后内部受损程度.质量分数为5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液冻融环境下,橡胶混凝土相对动弹性模量变化如图3所示.

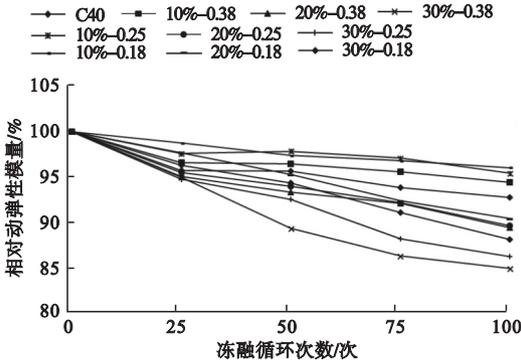


图3 冻融循环后相对动弹性模量

Fig.3 Relative dynamic elastic modulus after freeze - thaw cycles

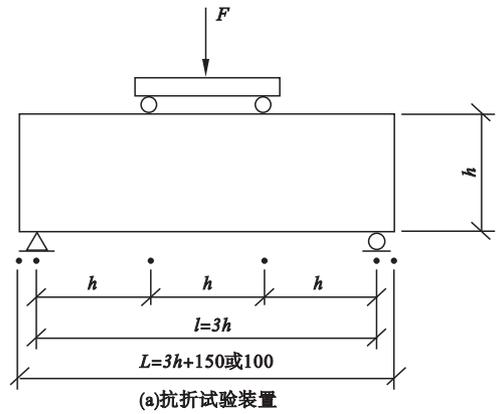
由图3可知,随着冻融循环次数的增加,普通混凝土与橡胶混凝土的相对动弹性模量整体均呈下降趋势,说明混凝土经过冻融循环后其内部都受到了不同程度的损伤.100次冻融循环期间,混凝土相对动弹性模量随着橡胶掺量的增加而降低;同掺量下,橡胶粉的粒径越大,相对动弹性模量越小.在10%掺量的情况下,冻融循环期间橡胶混凝土的相对动弹性模量均高于基准混凝土的92.8%.其中10%掺量下粒径0.18mm的橡胶混凝土经历100次冻融循环后相对动弹性模量下降最少,下降至96.1%;其他掺量的橡胶混凝土100次冻融后的相对动弹性模量均低于基准混凝土,且30%掺量下粒径0.38mm的橡胶混凝土下降最多,下降至85%.

由以上分析可见,掺量为10%的橡胶混凝土的抗冻性能最好,且随着橡胶粉粒径的减小,混凝土的抗冻性能有所提高.分析其原因为,一方面橡胶粉的掺入引入一定量的气泡,其均匀地分布在混凝土内,大大的缓解了孔隙自由水冻结所带来的膨胀压力,提高混凝土的抗冻性;另一方面,混凝土中的孔隙被微小的橡胶粉填补,提高了混凝土的密度,

在一定程度上混凝土的抗冻性得到了提高.但是橡胶粉与水泥石界面的粘结力较小,随着橡胶掺量的增加,在冻融循环和硫酸盐侵蚀共同作用下很容易产生界面裂缝,使得更多的硫酸盐溶液渗入,加速混凝土内部破坏,从而降低混凝土的抗盐冻性能.综合以上原因,掺量10%、粒径为0.18mm的橡胶混凝土的抗冻性能最好.

### 2.3 混凝土抗弯强度的变化

抗弯强度是指材料抵抗弯曲不断裂的能力.将经过不同次数5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液冻融循环后的橡胶混凝土试件取出,对其进行四点抗弯试验.将取出后的混凝土试件擦洗干净放置于试验机上,按图4(a)的要求调整试件与承压架的位置,安装尺寸偏差不应大于1mm,试验时试件的承压面应选择试件成型时的侧面.试验现场图见图4(b),其试验结果如表4所示.



(b)抗折试验现场图

图4 抗折试验装置及现场试验图

Fig.4 Flexural resistance test device and field test

表4 冻融循环后的抗弯强度

Table 4 Flexural strength after the freeze - thaw cycles

编号	抗弯强度/MPa			
	0次	25次	50次	100次
CC	3.99	4.09	3.86	3.77
RC-10-0.38	3.59	4.01	3.55	3.27
RC-20-0.38	3.39	3.67	3.35	2.74
RC-30-0.38	3.24	3.50	3.17	2.15
RC-10-0.25	3.95	3.86	3.46	3.55
RC-20-0.25	3.67	3.56	3.16	3.09
RC-30-0.25	3.55	3.25	2.78	2.61
RC-20-0.18	3.49	3.70	3.51	3.17
RC-10-0.18	3.24	3.47	2.93	2.77
RC-30-0.18	2.49	3.07	2.34	2.10

由表4可知,橡胶混凝土的抗弯强度在冻融循环前后均低于基准混凝土的抗弯强度.试件经过冻融循环后,其抗弯强度均呈现下降的趋势,是由于混凝土经过冻融和硫酸盐侵蚀共同作用下,混凝土内部的孔隙及产生的细微裂纹会逐渐增多,且裂纹宽度会逐渐增大.即橡胶混凝土试块表面形成的裂缝随着冻融循环次数的增加而增多,进而抗弯强度呈现出下降的趋势.但是当冻融循环25次时,各混凝土试件的抗弯强度出现小幅增加,分析其原因为试件在冻融过程中不断吸水,硫酸钠溶液渗入到混凝土试件中发生化学反应生成了膨胀物钙矾石和石膏等,混凝土中的缝隙得到了填补,导致混凝土内部更加密实,抗弯强度得到提高.

当橡胶粒径相同时,混凝土的抗弯强度与橡胶粉的掺量成反比,即随着橡胶粉掺量的增加而降低.100次冻融循环后,掺量30%、粒径为0.38 mm的橡胶混凝土的抗弯强度降低最多,抗弯强度为2.15 MPa,降幅达33.59%,降幅远大于基准混凝土的5.51%;当橡胶掺量相同时,100次冻融循环后粒径0.38 mm与0.18 mm的橡胶混凝土抗弯强度相近,粒径0.25 mm的橡胶混凝土抗弯强度最高.100次冻融循环后橡胶掺量10%、粒径为0.25 mm的橡胶混凝土的抗弯强度最大,为3.55 MPa,比其初始抗弯强度

下降了10.17%,降幅高于基准混凝土.由此可见,若采用橡胶混凝土应用于实际工程,推荐采用抗弯性能较好的掺量为10%、0.25 mm的橡胶混凝土.

橡胶粉与水泥石界面结合脆弱,所以当橡胶掺量增大,橡胶混凝土内部的软弱结合面增多,导致其抗弯强度降低.从橡胶粒径方面考虑,橡胶粉越细,导致其软弱结合面越多,所以在相同掺量下,橡胶粉越细的试件内部薄弱面多,抗弯强度也就相应低一些.另外随着冻融循环次数的增加,更多的硫酸盐溶液渗入到混凝土内部发生反应,对混凝土造成硫酸盐侵蚀破坏.

### 3 结 论

(1)橡胶粉的掺入减缓了混凝土的质量损失,随着橡胶掺量的增加,试件的质量增长越大;在100次冻融循环期间,混凝土未表现出明显的质量损失.

(2)橡胶粉的掺入减缓了混凝土的质量损失,并且硫酸盐前期对冻融有抑制作用,所以出现了混凝土的质量不降反增的现象.

(3)将橡胶粉掺入混凝土中对于改善混凝土的抗冻性效果明显,当橡胶粉的掺量为10%时,对于混凝土抗冻性能的改善作用最为明显;但是掺入过多的橡胶粉则会降低其抗冻性.所以从抗冻性方面考虑,推荐采用掺量10%、粒径0.18 mm的橡胶混凝土.

(4)橡胶混凝土的抗弯强度较基准混凝土有所降低,橡胶混凝土的抗弯强度随着橡胶掺量的增加而降低,对于粒径方面,并不是橡胶粒径越小抗弯强度越好.若采用橡胶混凝土应用于实际工程,本试验推荐采用抗弯性能较好的掺量为10%、0.25 mm的橡胶混凝土.

### 参考文献

- [1] 徐亚丁,王玲,王振地.混凝土冻融/盐冻破坏现象、机理和试验方法[J].硅酸盐通报,2017,36(2):491-496.  
(XU Yading, WANG Ling, WANG Zhendi. Phenomenon mechanism and test method of

- concrete freeze-thaw/salt frost damage [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(2):491-496.)
- [2] 刘辉. 硫酸盐侵蚀与冻融循环双重因素对混凝土耐久性的影响[D]. 成都:西南交通大学, 2013.  
(LIU Hui. On sulfate attack and freeze-thaw cycles double factors influence on durability of concrete [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.)
- [3] 苑立冬, 牛荻涛, 姜磊, 等. 硫酸盐侵蚀与冻融循环共同作用下混凝土损伤研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(6):1171-1176.  
(YUAN Lidong, NIU Ditao, JIANG Lei, et al. Study on damage of concrete under the combined action of sulfate attack and freeze-thaw cycle [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013, 32(6):1171-1176.)
- [4] LI W, HUANG Z, WANG X C, et al. Review of crumb rubber concrete [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 672-674:1833-1837.
- [5] 潘东平, 刘锋, 李丽娟, 等. 橡胶混凝土的应用和研究概况[J]. 橡胶工业, 2007, 54(3):182-185.  
(PAN Dongping, LIU Feng, LI Lijuan, et al. Application and research survey of rubber concrete [J]. China rubber industry, 2007, 54(3):182-185.)
- [6] 朱涵, 李威, 朱学超. 常、低温下橡胶集料混凝土抗冲击性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017, 30(2):24-30.  
(ZHU Han, LI Wei, ZHU Xuechao. Research on performance of crumb rubber concrete under room and low temperature impact [J]. Journal of Shijiazhuang tiedao university (natural science edition), 2017, 30(2):24-30.)
- [7] 章旸, 朱涵, 曹邦海, 等. 新型U型混凝土冲击试验方法[J]. 低温建筑技术, 2012(3):4-5.  
(ZHANG Yang, ZHU Han, CAO Banghai, et al. New U-shaped concrete impact test method [J]. Low temperature architecture technology, 2012(3):4-5.)
- [8] 周梅, 朱涵, 张世越, 等. 橡胶集料混凝土力学及收缩性能的试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2010, 29(6):1456-1462.  
(ZHOU Mei, ZHU Han, ZHANG Shiyue, et al. Experimental study on mechanical and shrinkage performance of crumb rubber concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2010, 29(6):1456-1462.)
- [9] ELDIN N N, SENOUCI A B. Rubber-tire particles as concrete aggregate [J]. Journal of materials in civil engineering, 1993, 5(4):478-496.
- [10] KHATIB Z K, BAYOMY F M. Rubberized portland cement concrete [J]. Journal of materials in civil engineering, 1999, 11(3):206-213.
- [11] ŠEFFLOVÁ, MAGDALÉNA, PAVLŮ T. The durability of fine recycled aggregate concrete [J]. Advanced materials research, 2017, 1144:59-64.
- [12] MCISAAC A, FAM A. Durability under freeze-thaw cycles of concrete beams retrofitted with externally bonded FRPs using bio-based resins [J]. Construction and building materials, 2018, 168:244-256.
- [13] PAINE K, DHIR R, MORONEY R, et al. Use of crumb rubber to achieve freeze thaw resisting concrete [C] // Proceedings of the international conference on concrete for extreme conditions. Dundee, Scotland: University of Dundee, 2002:486-498.
- [14] SAVAS B Z, AHMAD S, FEDROFF D. Freeze-thaw durability of concrete with ground waste tire rubber [J]. Journal of the transportation research board, 1997, 1574:80-88.
- [15] 陈波, 张亚梅, 陈胜霞, 等. 橡胶混凝土性能的初步研究[J]. 混凝土, 2004(12):37-39.  
(CHEN Bo, ZHANG Yamei, CHEN Shengxia et al. Fundamental research of properties of rubberized concretes [J]. Concrete, 2004(12):37-39.)
- [16] 李光宇. 橡胶粉混凝土抗冻性能试验研究[J]. 混凝土, 2008(4):60-62.  
(LI Guangyu. Experimental study on frost-resistance properties of powered rubber concrete [J]. Concrete, 2008(4):60-62.)
- [17] 李清海, 史新亮, 孙蓓, 等. 橡胶微粒路面混凝土抗冻性研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(5):21-23.  
(LI Qinghai, SHI Xinliang, SUN Bei, et al. Investigation on freeze-thaw durability of paving concrete with rubber particals [J]. China concrete and cement products, 2008(5):21-23.)
- [18] 许金余, 李赞成, 罗鑫. 橡胶混凝土抗冻性的对比研究[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(4):98-103.  
(XU Jinyu, LI Zancheng, LUO Xin. Comparative study on the frost-resisting properties of rubber powder concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2014, 33(4):98-103.)
- [19] 王苏岩, 常壮. 持载和冻融循环对CFRP-高强混凝土界面的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014(5):794-801.  
(WANG Suyan, CHANG Zhuang. Influence of sustained load and freeze-thaw cycle on bond performance of high strength concrete reinforced with CFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014(5):794-801.)
- [20] WANG Hui, GAO Xiaojian, LIU Junzhe. Coupling effect of salt freeze-thaw cycles and cyclic loading on performance degradation of carbon nanofiber mortar [J]. Cold regions science and technology, 2018, 154:95-102.  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)