

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.039

# 疲劳荷载作用下纳米 SiO<sub>2</sub>改性路面混凝土 抗冻性及孔结构研究

周学翔,郑文诗,吴聪

(广西交通职业技术学院,广西南宁 530000)

**摘要:**为提高混凝土路面在疲劳荷载作用下的抗冻性,通过室内疲劳加载及冻融循环交替试验模拟混凝土路面在车辆荷载作用下的冻融破坏;同时设计抗弯拉试验测试纳米 SiO<sub>2</sub>改性路面混凝土在冻融后的剩余弯拉强度,采用压汞法测试混凝土细观孔结构,借助电子显微镜观察混凝土孔隙在疲劳荷载作用下的变化规律,研究纳米 SiO<sub>2</sub>掺量、疲劳荷载作用次数等对路面混凝土抗冻性的影响。结果表明:在疲劳荷载作用下,掺加适量纳米 SiO<sub>2</sub>能明显提高混凝土路面抗冻性,且随荷载作用次数增加,纳米 SiO<sub>2</sub>改善效果越显著,纳米 SiO<sub>2</sub>掺量为 2% 时,抗冻性最好;疲劳荷载会破坏混凝土孔结构稳定性,造成孔隙贯通,加速混凝土试件的冻融损伤;纳米 SiO<sub>2</sub>能够填充混凝土孔隙,降低空隙率,改善混凝土孔径分布,有效减缓疲劳荷载引起的孔结构失稳、孔隙贯通现象,进而提高混凝土路面抗冻性。

**关键词:**道路工程;纳米 SiO<sub>2</sub>;抗冻性;疲劳荷载;孔结构;路面混凝土

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国地域辽阔,寒冷地区分布广泛,主要集中在东北、西北一带,寒区气候环境特殊,冻融循环是其主要特点。常年冻融循环对分布在寒区的道路、桥梁混凝土耐久性造成了极大损伤,影响其美观性及使用寿命<sup>[1-2]</sup>。特别是针对路面混凝土,其断面较厚,导热性差,寒区温差大,混凝土板上下温度不均,易产生裂缝,在冬末初春时分,路面融化的雨水沿着裂缝进入混凝土板内,随着温度的降低、升高,继而加剧冻融循环破坏<sup>[3-5]</sup>。由此可见,改善寒区路面混凝土抗冻性是提高其耐久性的关键。

关于提高混凝土耐久性的研究,国内外学者做了大量的研究工作。郭寅川等<sup>[6]</sup>研究采用水性环氧树脂改善桥面板混凝土的耐久性,研究发现:水性环氧树脂与水泥石结合形成致密的三维网状结构,有利于增强混凝土抗弯拉性和疲劳性能。针对抗冻性,Liu等<sup>[7]</sup>向混凝土中掺入硅灰提高其抗冻性,通过扫描电镜等手段,发现硅粉显著改善了混凝土孔结

构,空隙率减小,对比基准组,相对动弹模量及质量损失率有了较好改善;董玉文等<sup>[8]</sup>对比研究不同冻融次数及橡胶粉掺量对混凝土抗冻性的影响,结果表明:在冻融次数较小时,橡胶粉对其抗冻性影响不大,当冻融次数增大到 150 次时,随着橡胶粉掺量增加,混凝土质量损失率先减小后增大,橡胶粉掺量为 15 kg/m<sup>3</sup> 的试件质量损失率比基准组下降 3.23%。除了硅灰、橡胶粉,也有学者研究不同石墨烯掺量下混凝土抗冻性的变化规律,从试验结果得出 0.1% 掺量的石墨烯抗压强度和抗冻性最好,主要是由于其在水泥浆中形成的相互交叉的微晶体结构,弥补了混凝土结构疏松的弊端,从而减少了冻融循环对其破坏<sup>[9-11]</sup>。高国华等<sup>[12]</sup>指出纳米 SiO<sub>2</sub>能够有效增强石料裹浆能力,在电子显微镜观察下,纳米 SiO<sub>2</sub>明显改善了混凝土界面过渡区的微观结构,使其更加致密,孔隙明显降低,从宏观上表现出其抗冻性极大提高;Puentes等<sup>[13]</sup>、Said等<sup>[14]</sup>同样认为,纳米 SiO<sub>2</sub>可降低混凝土空隙率,增强混凝土密实性、强度及抗冻性。

综上所述,国内外学者对混凝土抗冻性的研究较单一,未考虑路面荷载因素。基于此,本文将纳米

收稿日期:2022-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51768016);广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(编号:2021KY1137)

作者简介:周学翔,男,硕士,工程师.E-mail:1468695530@qq.com

材料掺入混凝土中,纳米材料种类较多,但大多价格昂贵且稀少,考虑到纳米 SiO<sub>2</sub> 价格低廉、易获取,且具有表面能等优点,选取纳米 SiO<sub>2</sub> 用于改性混凝土抗冻性,通过采集质量损失率、动弹模量以及剩余抗拉强度等数据,研究纳米 SiO<sub>2</sub> 对混凝土抗冻性的改善效果,同时对其施加疲劳荷载,模拟车辆荷载作用下纳米 SiO<sub>2</sub> 对路面混凝土抗冻性的改善效果。

## 1 试验设计

### 1.1 原材料

选用秦岭牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥;粗集料采用石灰岩;细集料选用 0~5 mm 机制砂;减水剂采用

聚羧酸高性能减水剂;水为普通饮用水;纳米 SiO<sub>2</sub> 采用亲水型气相纳米 SiO<sub>2</sub>, 其外观呈白色粉末状,具体技术指标如表 1 所示。

表 1 纳米 SiO<sub>2</sub> 化学组成及主要技术参数

纯度/ %	OH <sup>-</sup> 含 量/%	平均粒 径/nm	比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	表观密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	pH 值
≥99.8	>45	20~40	320	<0.12	3.7~4.5

### 1.2 配合比设计

为比较纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对路面混凝土抗冻性的影响,本文设计了基准组与纳米组混凝土配合比,如表 2 所示。基于研究者前期大量的砂浆试验结果,对纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量范围进行了优选,最终确定纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量为 1%、2%、3%。

表 2 纳米 SiO<sub>2</sub> 改性路面混凝土配合比

编号	材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )							水灰比
	水泥	水	粗集料	细集料	机制砂	纳米 SiO <sub>2</sub>	减水剂	
C40-J	403.00	146	1014	312	812.71	0.00	3.224	0.36
C40-1%	398.97	146	1014	312	812.71	4.03	3.224	
C40-2%	394.94	146	1014	312	812.71	8.06	3.224	
C40-3%	390.91	146	1014	312	812.71	12.09	3.224	

注:编号中 C40 代表混凝土强度等级, J 表示基准组, 1% 代表混凝土试件纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量为胶凝材料的 1%。以此类推。

## 2 试验方法及方案

### 2.1 疲劳加载模拟试验

为了更真实地反映车轮荷载在水泥混凝土路面的受力状况,本文采用 MTS 万能试验机,如图 1 所示,鉴于车辆在路面行驶是一个动态疲劳加载过程,试验选取 10 Hz 加载频率,控制加载应力,选择正弦波加载形式,采用 100 mm×100 mm×400 mm 的小梁试件进行疲劳加载。同时考虑到纳米 SiO<sub>2</sub> 改性混凝土试件在疲劳荷载作用下的阶段性破坏,本文设计了分阶段疲劳加载方案,基于路面轴载分布状况,选择 0.7 荷载应力水平,将疲劳加载分为 I、II、III (疲劳加载次数为 0、4 万次、8 万次) 3 个作用阶段,每个阶段都在前一步骤结束后进行,同时设计了基准组和不同纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量混凝土,研究纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量对混凝土疲劳加载的影响。



图 1 MTS 万能试验机

### 2.2 疲劳荷载作用下混凝土冻融测试方法

研究表明:疲劳荷载和冻融循环共同作用下,混凝土质量损失、弯拉强度下降更加明显,微观上则表现出混凝土裂缝延长加宽、孔结构的扩展贯通等<sup>[15-17]</sup>。因此,本节将开展在疲劳荷载作用下混凝土抗冻性测试。同时为了研究纳米 SiO<sub>2</sub> 改性混凝土在最不利条件下的冻融损坏情况,试验将冻融循环温度范围设置为 -20~5 °C。基于前文的疲劳加载试

验,对于每一组混凝土试件,在每个疲劳加载阶段结束后,采用快冻法对混凝土试件进行冻融,试验冻融次数初定为300次,直到满足规范规定的试验停止标准,所用冻融机如图2所示。冻融结束后,对冻融后试件测试剩余弯拉强度,基于以上试验结果,对基准组混凝土及一组最优的纳米掺量混凝土,采用压汞仪测试两组试件孔结构参数及孔径分布,同时借助光学电子显微镜观察混凝土试件孔隙结构,试验设备如图3所示,具体试验方案见表3。

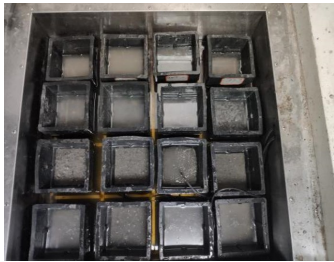
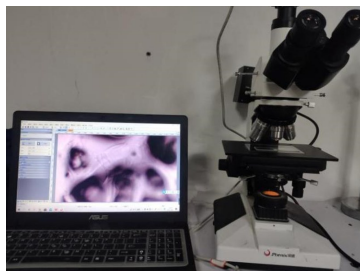


图2 混凝土冻融试验机及冻融试件



(a)压汞仪



(b)光学电子显微镜

图3 混凝土孔隙测试设备

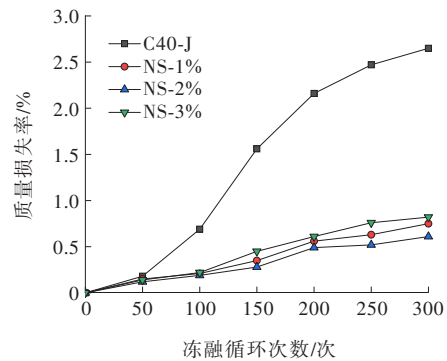
### 3 结果及讨论

#### 3.1 纳米 SiO<sub>2</sub>改性混凝土抗冻性随荷载作用阶段的变化规律

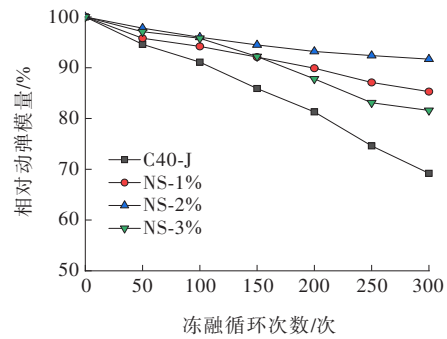
对纳米 SiO<sub>2</sub>改性混凝土试件分阶段疲劳加载后,对应不同加载阶段,分别进行冻融循环,试验结果如图4~6所示。

表3 试验方案设计

应力水平	试验温度/°C	纳米 SiO <sub>2</sub> 掺量/%	作用阶段	加载次数/万次	冻融循环次数/次	
0.7	-20~5	0	I	0	300	
			II	4		
			III	8		
			I	0		
			II	4		
			III	8		
		1	300	2	II	4
					III	8
					I	0
					II	4
					III	8
					I	0
3	300	3	II	4		
			III	8		
			I	0		
			II	4		
			III	8		
			I	0		



(a)质量损失率



(b)相对动弹模量

图4 作用阶段 I 下纳米 SiO<sub>2</sub>改性混凝土抗冻性变化规律

从图4~6可知:在0.7应力水平作用下,不论是在哪种疲劳荷载作用阶段,对于基准组混凝土和掺纳米 SiO<sub>2</sub>组混凝土,都表现出随着冻融循环次数的增加,混凝土质量损失率逐渐增大,相对动弹模量逐渐减小。对比未加载的冻融组试件,当疲劳荷载次数增加到4万、8万次时,其混凝土的冻融损伤现象更

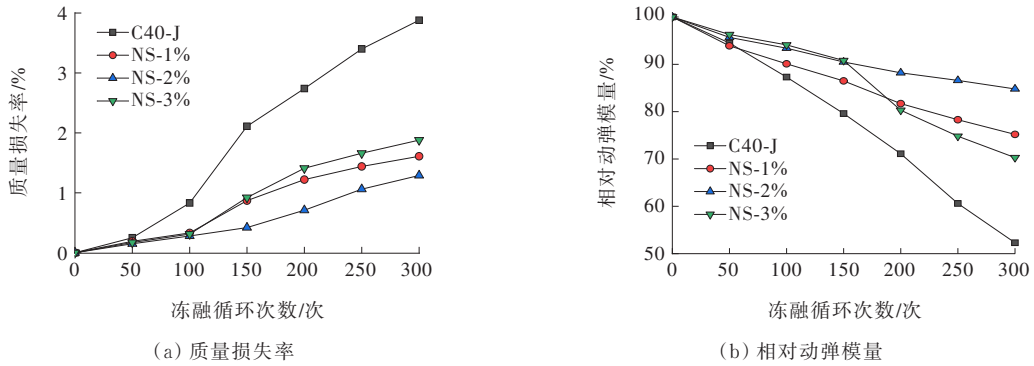


图5 作用阶段Ⅱ下纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土抗冻性变化规律

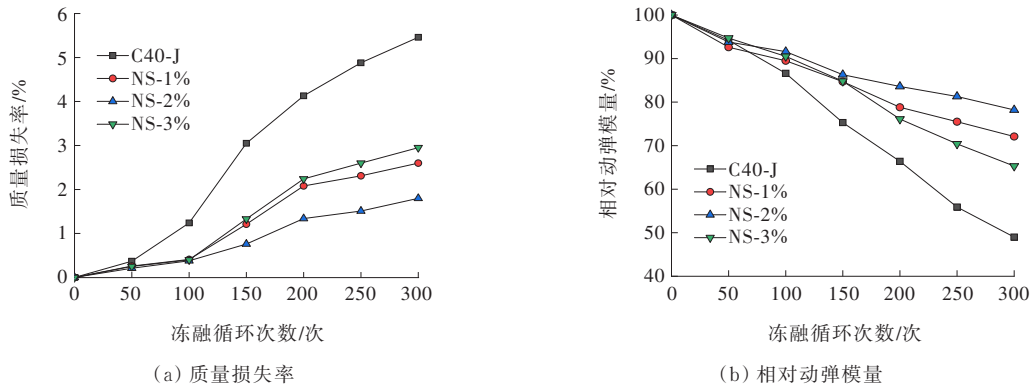


图6 作用阶段Ⅲ下纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土抗冻性变化规律

严重。同时也可以看出：纳米 SiO<sub>2</sub>对混凝土抗冻性具有明显改善效果，其中 2% 纳米 SiO<sub>2</sub>掺量的混凝土质量损失最少、相对动弹模量最大、抗冻性最好，且随着纳米 SiO<sub>2</sub>掺量从 1% 增加到 3%，混凝土质量损失率呈现先减小后增大的趋势，说明纳米 SiO<sub>2</sub>掺量并不是越多越好，这与詹培敏等<sup>[18]</sup>的研究结论相一致。

纳米 SiO<sub>2</sub>对混凝土抗冻性的改善，主要与纳米 SiO<sub>2</sub>的填充效应有关，纳米 SiO<sub>2</sub>分子尺寸小，能够有效填充混凝土内部孔隙结构，增加混凝土结构的均匀性和致密性，从而提高抗冻性。当疲劳荷载作用次数增大时，会破坏混凝土内部结构，特别是加大混凝土裂纹的扩展延伸，导致在相同冻融次数下，混凝土冻融破坏更严重。但是当纳米 SiO<sub>2</sub>掺量过多时，会降低水泥浆体的流动性，导致纳米 SiO<sub>2</sub>在水泥浆中分散不均匀，在混凝土试件成型中，造成大孔增多，孔隙劣化加重，反而会不利于改善混凝土抗冻性<sup>[19]</sup>。

### 3.2 纳米 SiO<sub>2</sub>混凝土冻融后剩余弯拉强度

通过对混凝土试件抗冻性试验结果分析可以看

出：在冻融循环和疲劳荷载的共同作用下，纳米 SiO<sub>2</sub>改性路面混凝土试件的抗冻性更好，说明掺加适量纳米 SiO<sub>2</sub>的确能够改善混凝土抗冻性。然而对于路面混凝土，更重要的是其在冻融及荷载作用后，剩余抗弯拉强度能否满足道路使用要求，这直接关系到路面结构的使用安全。图 7 为不同纳米 SiO<sub>2</sub>掺量下路面混凝土试件在不同荷载作用阶段下，经过 300 次冻融循环后的剩余抗弯拉强度。

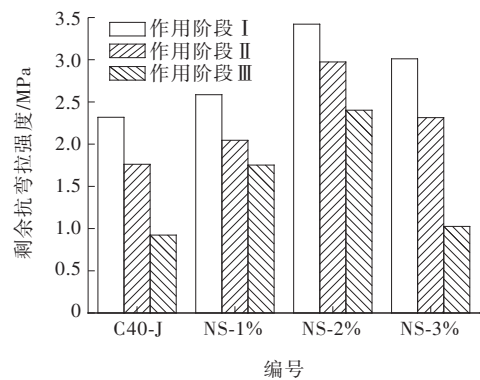


图7 纳米SiO<sub>2</sub>改性路面混凝土冻融后剩余抗弯拉强度

由图 7 可知：随纳米 SiO<sub>2</sub>掺量的增加，混凝土冻融后剩余抗弯拉强度变化规律与抗冻性指标一致，

均先增加后减小,在纳米SiO<sub>2</sub>掺量为2%时,剩余抗弯拉强度最大。在疲劳荷载次数为0、4万、8万次时,相比基准组,2%纳米SiO<sub>2</sub>掺量组混凝土剩余抗弯拉强度分别增加了47.58%、68.79%及160.24%,疲劳荷载作用次数越大,纳米SiO<sub>2</sub>对混凝土冻融后剩余抗弯拉强度提升效果越明显。当纳米SiO<sub>2</sub>掺量增加到3%时,对混凝土剩余抗弯拉强度增加效果减弱,在疲劳荷载作用8万次后,其剩余抗弯拉强度仅比基准组提高11.16%。分析原因认为,这主要与纳米SiO<sub>2</sub>的高化学活性与火山灰效应有关,在混凝土强度形成过程中,纳米SiO<sub>2</sub>参与了水泥的水化反应,与水化产物氢氧化钙反应生成C—H—S凝胶,填充界面过渡区孔隙,从而增强了水泥浆界面强度,在混凝土后期经历冻融循环和疲劳荷载交替作用后,剩余抗弯拉强度也更高<sup>[20]</sup>。

### 3.3 纳米SiO<sub>2</sub>混凝土孔结构变化规律

图8为基准组与纳米SiO<sub>2</sub>掺量为2%时的混凝土孔结构参数在冻融循环和不同荷载交替作用时的变化规律。从图8可以看出:不论是基准混凝土还是掺纳米SiO<sub>2</sub>混凝土组,随着疲劳荷载作用次数的增

加,混凝土各孔隙结构参数均增大,说明疲劳荷载作用次数加速了混凝土孔结构的劣化。当疲劳荷载作用次数逐渐增大到8万次,基准混凝土空隙率从13.745%增加到23.112%,增幅为68.15%,掺纳米SiO<sub>2</sub>混凝土空隙率从12.059%增加到17.526%,增幅为45.33%。对比基准混凝土,随着纳米SiO<sub>2</sub>的掺入,混凝土各孔隙结构参数增幅均明显减小,说明纳米SiO<sub>2</sub>能够有效抑制疲劳荷载引起的混凝土孔隙增多和孔结构劣化,从而能够降低混凝土在冻融循环时孔隙相互贯通的概率。与其余孔隙结构参数不同的是,纳米SiO<sub>2</sub>混凝土总孔隙面积在各个荷载作用阶段大于基准混凝土,这是由于在空隙率降低时,总孔隙面积越大,孔隙尺寸越小<sup>[21]</sup>。图9、10为基准组与纳米SiO<sub>2</sub>混凝土孔结构显微扫描图。从图9、10也可以看出:随着疲劳荷载的进一步增大,纳米SiO<sub>2</sub>能够有效延缓孔结构的扩大、贯通。从图9(c)可以看到:当疲劳荷载增加到8万次时,混凝土相邻两孔隙已经互相贯通,这会明显加大混凝土冻融破坏。而纳米组混凝土在疲劳荷载作用下,孔隙发展减缓,有利于增强混凝土抗冻性,这也从侧面解释了混凝土孔结构参

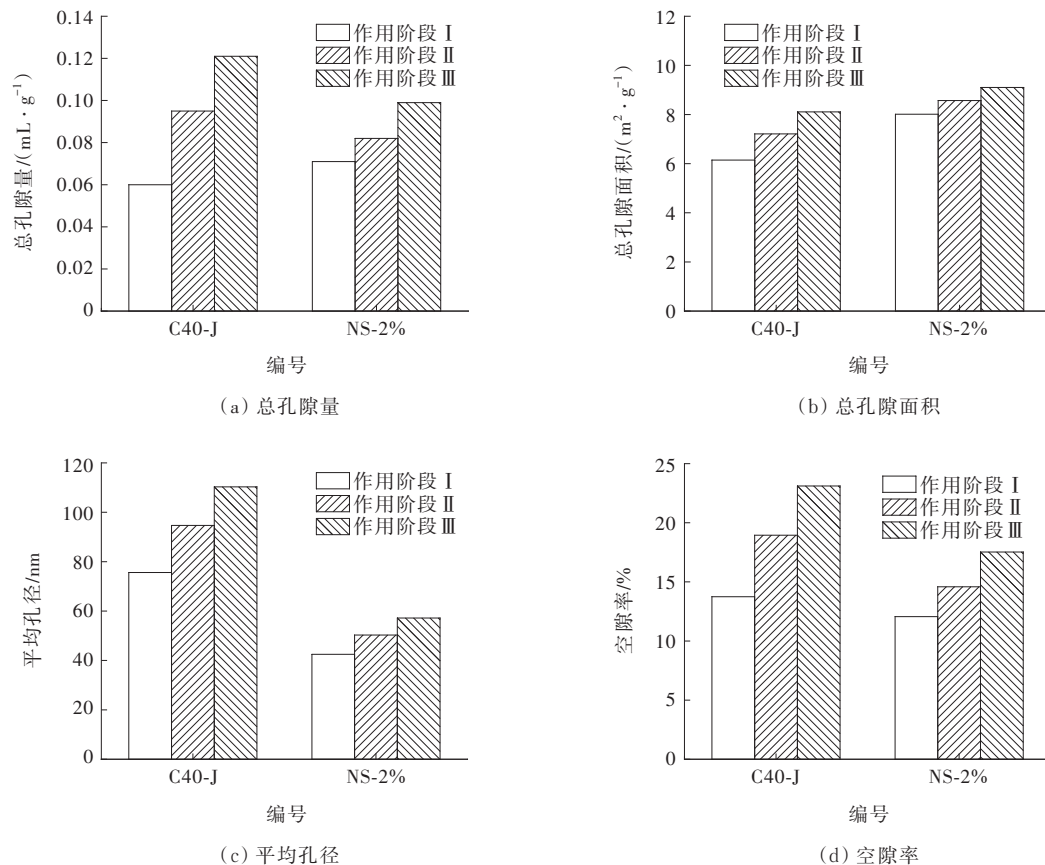
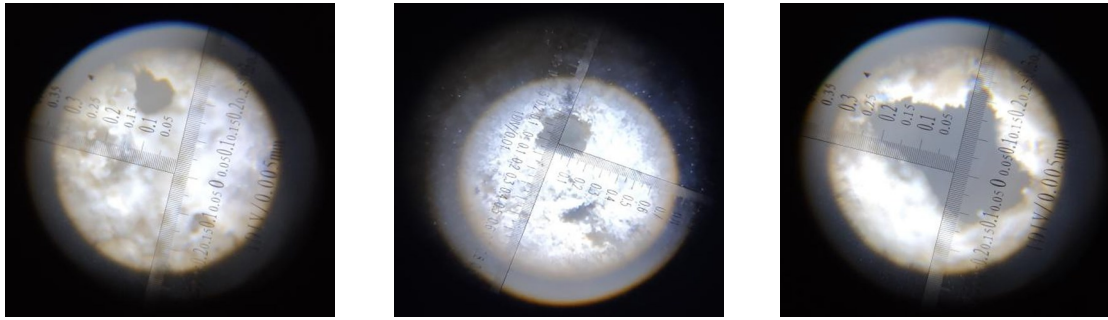
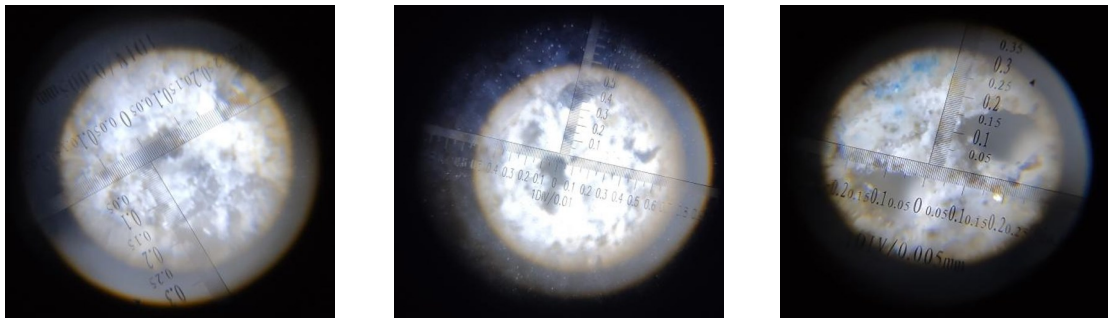


图8 疲劳荷载和冻融循环交替作用下混凝土孔结构参数变化规律



(a) 作用阶段 I (b) 作用阶段 II (c) 作用阶段 III

图9 基准混凝土孔结构随疲劳荷载作用阶段变化扫描图



(a) 作用阶段 I (b) 作用阶段 II (c) 作用阶段 III

图10 纳米SiO<sub>2</sub>混凝土孔结构随疲劳荷载作用阶段变化扫描图

数随疲劳荷载的变化规律。

另一方面,根据孔径大小将混凝土中孔隙分为:无害孔(<20 nm)、少害孔(20~50 nm)、有害孔(50~200 nm)及多害孔(>200 nm)。研究疲劳荷载及冻融循环交替作用下混凝土孔径分布情况,结果如图11所示。

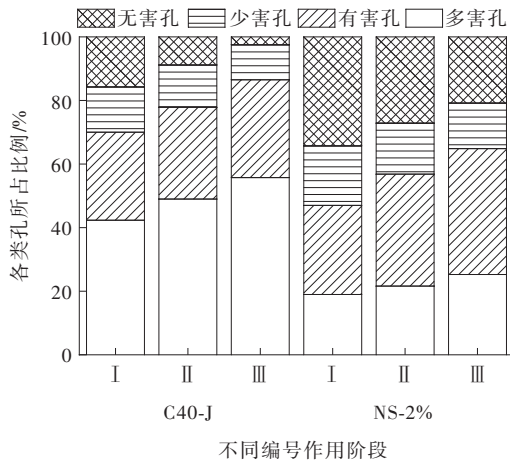


图11 疲劳荷载与冻融循环作用下混凝土孔径分布情况

从图11可以看出:随着疲劳荷载作用次数的增加,基准组与纳米SiO<sub>2</sub>混凝土多害孔和有害孔所占比例增加,无害孔及少害孔逐渐减少。但是纳米

SiO<sub>2</sub>混凝土多害孔及有害孔的占比明显小于基准混凝土,当疲劳荷载增加至8万次,且经过300次冻融循环后,基准混凝土多害孔从42.35%增加到55.74%,增幅为31.62%,而纳米SiO<sub>2</sub>混凝土多害孔仅从18.97%增加到25.25%,表明纳米SiO<sub>2</sub>的加入改善了混凝土内部孔径分布,降低了多害孔及有害孔的占比,有效抑制孔隙结构的劣化。在混凝土路面经历疲劳荷载及冻融循环作用时,纳米SiO<sub>2</sub>能够减小混凝土孔隙贯穿、劣化程度,改善孔径分布情况,从而有效提高混凝土路面的抗冻性。

### 4 结论

(1) 在疲劳荷载与冻融循环交替作用下,适量的纳米SiO<sub>2</sub>能够显著降低混凝土路面的质量损失以及改善动弹模量,纳米SiO<sub>2</sub>极小的分子尺寸以及在混凝土中起到的晶核作用,增强了混凝土结构的密实性及稳定性,从而提高其抵抗荷载及冻融的能力。

(2) 纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土试件在经历疲劳荷载及冻融循环后,其剩余抗弯拉强度仍明显大于基准混凝土,且随着疲劳荷载作用次数的增加,剩余抗弯

拉强度下降的幅度也小于基准混凝土。

(3) 纳米SiO<sub>2</sub>的加入细化了混凝土孔结构,使得混凝土结构更加紧凑密实,除此之外,纳米SiO<sub>2</sub>改善了混凝土孔径分布情况,有效阻断孔隙间的贯穿连通,减少水分进入混凝土内部,降低混凝土路面冻融破坏风险。

(4) 混凝土内部结构微观形貌以及界面区裂缝等对掌握混凝土路面的冻融机理、了解纳米SiO<sub>2</sub>在混凝土中扮演的角色十分重要,但是由于试验条件限制,本文尚未涉及,后续将对纳米SiO<sub>2</sub>改性混凝土路面的微观作用机理展开研究。

#### 参考文献:

- [1] 崔宏环,王伟浩,闫子麟,等.季冻区路基填土冻胀特性试验研究[J].中外公路,2021,41(1):21-25.
- [2] 郭寅川,申爱琴,王胜难,等.季冻区路面混凝土界面区劣化行为及与强度相关性[J].中国公路学报,2019,32(8):49-57.
- [3] 薛刚,张悦.冻融循环作用后橡胶混凝土与钢筋锚固性能试验研究[J].硅酸盐通报,2019,38(1):1-6.
- [4] 吕翔.季冻区玄武岩纤维活性粉末混凝土耐久性能和力学性能研究[D].长春:吉林大学,2021.
- [5] 赵倩倩,程培峰,魏玉伟.季冻区水泥路面预防性养护时机的选择[J].科学技术与工程,2018,18(18):282-286.
- [6] 郭寅川,丑涛,申爱琴,等.湿热地区水性环氧树脂对桥面板混凝土疲劳性能的改善[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(4):1-10.
- [7] LIU Y J, DING L, YANG T Y, et al. Effect of silica powder to frost resistance of concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(3):032052.
- [8] 董玉文,彭亮,谢辉.橡胶粉对混凝土抗冻耐久性的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(7):112-117.
- [9] 陈旭,汉光昭,裴玉胜,等.不同含量石墨烯对混凝土抗冻性能的影响[J].建筑施工,2021,43(8):1659-1663.
- [10] 何威,许吉航.少层石墨烯对普通混凝土性能的影响[J].硅酸盐通报,2021,40(5):1477-1488.
- [11] 刘建邦,汪洋.氧化石墨烯对HVFA混凝土力学和耐磨性能的影响[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(5):693-699.
- [12] 高国华,黄卫东,李传海.纳米SiO<sub>2</sub>增强骨料裹浆对混凝土抗冻性能的改善[J].建筑材料学报,2021,24(1):45-53.
- [13] PUENTES J, BARLUENGA G, PALOMAR I. Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability[J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 154-161.
- [14] SAID A M, ISLAM M S, ZEIDAN M S, et al. Effect of nano-silica on the properties of concrete and its interaction with slag[J]. Transportation Research Record, 2021, 2675(9):47-55.
- [15] 赵百超,陈四利,侯芮.冻融循环与疲劳荷载作用下水泥土力学特性试验研究[J].中外公路,2021,41(4):362-365.
- [16] 逯静洲,张楠,国力,等.疲劳-冻融多次交互作用下混凝土损伤特性试验研究[J].混凝土,2018(4):46-49.
- [17] 逯静洲,田立宗,童立强,等.经受疲劳荷载与冻融循环作用后混凝土动态性能研究[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(5):1055-1066.
- [18] 詹培敏,孙斌祥,何智海,等.纳米碳酸钙对水泥基材料性能影响的研究进展[J].硅酸盐通报,2018,37(3):881-887,910.
- [19] 曹竞荣.纳米SiO<sub>2</sub>改性水泥混凝土优选及疲劳寿命预估[J].中外公路,2020,40(4):286-291.
- [20] YAN L, XING Y M, LI S W, et al. The micro analysis and influence of nano SiO<sub>2</sub> on high-temperature compressive performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC)[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(2):022082.
- [21] 张雄,黄廷皓,张永娟,等. Image-Pro Plus 混凝土孔结构图像分析方法[J].建筑材料学报,2015,18(1):177-182.