

纳米二氧化硅自密实道路混凝土 弯曲疲劳性能研究

高英力¹,周文娟¹,曾 维²,段开瑞¹

(1.长沙理工大学交通运输工程学院,湖南长沙410114;2.中建西部建设湖南有限公司,湖南长沙410004)

摘要 目的 通过掺入纳米二氧化硅颗粒优化自密实道路混凝土配合比,改善其弯曲疲劳性能. 方法 以填充性能和28 d抗压强度为评价指标,设计 $L_9(3^4)$ 正交试验优化混凝土初始配合比,选取4种配合比制备纳米改性自密实混凝土,进行四点弯曲疲劳试验,分别得到50%和95%存活率下基于两参数Weibull分布的概率疲劳方程,并借助SEM观察试件断面微观形貌. 结果 自密实道路混凝土取得最佳配合比时水胶比为0.26,纳米二氧化硅和硅灰分别占胶凝材料的质量分数为1%、10%;纳米二氧化硅颗粒掺量为1%的试件的疲劳性能最优,达到预估疲劳寿命 2.0×10^6 次时弯拉强度折减系数增大了1.4%~5.7%,且疲劳寿命对应力水平变化的敏感性降低了2.1%~9.8%;纳米颗粒具有物理填充效应并与水化产物发生二次反应生成低密度水化硅酸钙凝胶,填充内部微孔使结构更为致密. 结论 纳米二氧化硅能在一定程度上提升自密实道路混凝土的疲劳性能.

关键词 纳米二氧化硅;正交设计;自密实道路混凝土;弯曲疲劳;Weibull分布

中图分类号 TU528.37;U414 文献标志码 A

Study on Flexural Fatigue Performance of Nano-SiO₂ Self-Compacting Road Concrete

GAO Yingli¹, ZHOU Wenjuan¹, ZENG Wei², DUAN Kairui¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, China, 410114; 2. China West Construction Hunan Group Co. Ltd., Changsha, China, 410004)

Abstract: The mixing ratio of self-compacting road concrete was optimized by incorporating nano-SiO₂ particles to improve its flexural fatigue performance. Taking filling performance and 28 d compressive strength as evaluation indexes, $L_9(3^4)$ orthogonal tests were designed to optimize the initial mix proportion of concrete. Four kinds of mix ratios were selected to prepare nano-modified

收稿日期:2019-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51978080);国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1833127);湖南省自然科学基金项目(2018JJ4016);湖南省教育厅科学研究重点项目(18A129)

作者简介:高英力(1977—),男,教授,博士,主要从事新型建筑材料和高性能功能路面材料方面研究.

self-compacting concrete. Four-point bending fatigue tests were carried out to obtain probabilistic fatigue equations based on Weibull distribution with 50% and 95% survival rates, respectively. And observed the microscopic morphology of the specimen cross section with the help of SEM. The results show that when the optimal mix ratio of self-compacted road concrete is obtained, the water-binder ratio is 0.26, nano-SiO₂ and silica fume accounted for 1% and 10% of the mass of binder respectively. The fatigue performance of the specimens doped with 1% nano-SiO₂ particles are the best. When the fatigue life is estimated 2×10^6 times, the reduction ratio of flexural tensile strength increases by 1.4% ~ 5.7%, and the sensitivity of fatigue life to the change of stress level decreases by 2.1% ~ 9.8%. Nano-SiO₂ particles have physical filling effect and react with hydration products to generate low density hydrated calcium silicate gel, filling the internal microporous to make the structure more compact. Nano-SiO₂ can improve the fatigue performance of self-compacting road concrete to some extent.

Key words: nano-SiO₂; self-compacting road concrete; orthogonal design; flexural fatigue; Weibull distribution

自密实混凝土在现场施工过程中无需振捣,依靠自身重力作用即能流动密实,减少了能源消耗以及噪声污染,是一种适用于铺筑路面的可持续节能材料^[1-2].这种混凝土既可以通过调整凹凸棒石等黏土颗粒掺量改善形状保持能力而用于滑模摊铺^[3-4],又可以减轻泌水及离析等问题而用于模板施工.同时,自密实刚性路面在超载作用下具有良好自愈能力,内部损伤较小时经养护后强度及耐久性可基本恢复^[5];当掺入再生胶粉取代部分细集料,可在一定程度上减轻废旧轮胎带来的环境污染和潜在的健康威胁^[2].此外,在旧路表面直接浇筑高性能自密实混凝土罩面或加铺层还可以延长道路使用寿命^[6].

随着纳米材料应用愈加广泛,将其用于自密实混凝土改性引发越来越多的关注. M. JALAL^[7]对比F类粉煤灰、硅灰及 nano-SiO₂ 颗粒对高性能自密实混凝土不同性能的影响,认为高掺量矿物掺合料结合少量纳米颗粒将成为高性能自密实混凝土关键材料.但不同纳米材料在单独或共同作用下对其性能及微观结构的改性效果和最佳掺量存在差异^[8-10],通常选用 nano-SiO₂、硅灰与水泥共同构成三元胶凝体系改善其流动性能以及硬化后的力学强度、断裂性能和耐久性^[11-13].水泥路面长期经受车辆轮载及温度周期性变

化重复作用,耐疲劳是对其最为重要的性能要求之一. S. GOEL^[14-15]通过研究三点、四点弯曲疲劳试验得到的 S-N 曲线发现自密实混凝土疲劳性能优于普通振动混凝土;而 S. KORTE^[16]研究发现自密实混凝土整体疲劳性能劣于相同抗压强度振动混凝土,弯曲疲劳性能和应力水平 0.9 时劈裂疲劳性能优于相同水灰比的振动混凝土; X. D. CHEN^[2,17]发现适量再生胶粉的加入可以提高混凝土的韧性,从而改善其疲劳性能和抵抗变形能力.

以往研究多验证了适量纳米材料的加入对水泥基材料力学强度及耐久性的提升作用,并指出纳米颗粒易发生团聚及降低水泥基材料流动性^[18],而对于 nano-SiO₂ 改性自密实道路混凝土疲劳性能的研究相对较少.基于此,笔者选取 nano-SiO₂ 作为改性材料,连同超细粉煤灰、硅灰等矿物掺合料制备自密实道路混凝土,优化配合比后进行四点弯曲疲劳试验;测得不同应力水平下的疲劳寿命,利用两参数 Weibull 分布处理数据,预测不同存活率下的疲劳寿命,得到存活率分别为 50% 和 95% 的概率疲劳方程.研究表明:在自密实混凝土中掺入 1% nano-SiO₂ 可以提升其疲劳性能,同时降低疲劳寿命对应力水平变化的敏感性.

1 试验

1.1 原材料

水泥(Cement, C): P·O42.5 水泥, 比表面积 330 m²/kg, 28 d 实测抗压强度 49.6 MPa, 表观密度 3 100 kg/m³; 超细粉煤灰(Ultrafine Fly Ash, UFA): 产自湖南岳阳电厂, 比表面积 525 m²/kg; 硅灰(Silica Fume, SF): 比表面积 2.7 × 10⁴ m²/kg; 纳米

二氧化硅(Nano-SiO₂, NS): 多微孔粒子型超细白炭黑; 粗集料: 公称最大粒径 13.2 mm 碎石, 压碎值 9.8%, 针片状质量分数 6.3%, 表观密度 2 730 kg/m³, 堆积密度 1 460 kg/m³; 细集料: 湘江河砂, 细度模数 2.75, 表观密度 2 650 kg/m³, 堆积密度 1 580 kg/m³; 外加剂: HT-HPC 聚羧酸高效减水剂, 减水率达 30%。胶凝材料化学成分及纳米颗粒基本性能分别见表 1、表 2。

表 1 胶凝材料化学组成

Table 1 Chemical components of binder

材料	w(SO ₃)	w(SiO ₂)	w(Fe ₂ O ₃)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)
C	2.41	23.30	2.77	5.41	61.16	2.65	0.68	0.07
SF	0.50	94.50	0.83	1.20	0.54	0.73	0.60	1.10
UFA	0.45	51.8	5.00	26.40	4.10	1.00	1.30	1.00

表 2 纳米二氧化硅性能参数

Table 2 Performance parameters of nano-SiO₂

材料	质量分数/%	表面羟基质量分数/%	pH	比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	平均粒径/nm	表观密度/(g·cm ⁻³)
NS	99.5	>45	5~7	250 ± 30	15	<0.12

1.2 试验方法

参照《自密实混凝土应用技术规程》(JGJ/T283—2012)和《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG E30—2005)计算自密实混凝土初始配合比, 并利用 L₉(3⁴) 正交表设计试验优化。选取四种配合比, 制备尺寸为 100 mm × 100 mm × 400 mm 试件, 在 20 ± 2 °C、相对湿度 95% 以上标准养护条件下养护 60 d, 采用应力控制模式, 施加特征值 R = 0.1 的无间歇正弦波疲劳荷载, 在 4 种应力水平(0.6、0.65、0.7 和 0.75) 下进行四点弯曲疲劳试验, 加载频率为 10 Hz。通过 SEM 试验观察试件断面微观形貌, 分析 nano-SiO₂ 对混凝土疲劳性能的影响。

算初始配合比为 m (粉煤灰): m (水泥): m (细集料): m (粗集料) = 0.3:0.7:1.39:1.68, 水胶比为 0.26, HT-HPC 聚羧酸高效减水剂为胶凝材料质量的 1.5%。初始配合比混凝土性能测试结果见表 3。保持胶凝材料总质量及粉煤灰掺量(胶凝材料质量的 20%) 不变, 选取水胶比 A 、nano-SiO₂ 掺量 B 和硅灰掺量 C (胶凝材料质量百分数) 为影响因素设计正交试验见表 4, 测试拌合物坍落扩展度以及硬化混凝土 28 d 抗压强度等指标综合评价其性能以确定最佳配合比。

表 3 混凝土填充性能及抗压强度

Table 3 Filling property and compressive strength of concrete

目标强度	坍落扩展度/mm	扩展时间/s	28 d 抗压强度/MPa
C55	605	2.6	62.9

2 配合比优化

2.1 正交试验设计

根据相关设计参数及目标强度 C55, 计

表4 $L_9(3^4)$ 正交试验方案及结果Table 4 Orthogonal test scheme and results for $L_9(3^4)$

编号	A	B/%	C/%	扩展度 (y_{1i})/mm	y_{1i} -550/mm	扩展时间 (y_{2i})/s	28 d 抗压强度 (y_{3i})/MPa	y_{3i} -60/MPa
1	0.24	0	0	590	40	3.9	60.3	0.3
2	0.24	1	5	575	25	4.1	68.5	8.5
3	0.24	2	10	545	-5	5.2	66.6	6.6
4	0.26	0	5	615	65	2.8	65.1	5.1
5	0.26	1	10	570	20	4.5	74.6	14.6
6	0.26	2	0	595	45	3.2	65.4	8.4
7	0.28	0	10	600	50	3.2	64.9	4.9
8	0.28	1	0	610	60	2.8	65.7	5.7
9	0.28	2	5	595	45	3.8	64.8	4.8

2.2 配合比优化

正交试验结果见表4,第3组混凝土拌合物坍落扩展度小于550 mm且扩展时间大于5 s,填充性能不满足要求。根据表5中极差分析结果,新拌混凝土填充性能影响因素的主次顺序依次为A, C, B, 优组合为 $A_3B_1C_1$ 。水胶比增大有利于提高浆体的流动性,能够增大混凝土拌合物的坍落扩展度,减少相应的扩展时间,而 nano-SiO₂ 及硅灰等比表面积较大矿物掺合料的加入会起到反作用。对于硬化混凝土28 d 抗压强度,影响因素的主次顺序依次为B, A, C, 优组合为 $A_2B_2C_3$,随水胶比及 nano-SiO₂ 掺量的增大,

强度均表现为先增大后减小的趋势,两者均存在相应的最佳值,而在所选范围内硅灰仅表现出促进强度增长的作用。考虑各因素对混凝土抗压强度的影响以及拌合物填充性能满足要求,选定配合比最优组合为 $A_2B_2C_3$ 。

扩展时间波动范围较小且基本满足要求,仅对坍落扩展度及抗压强度进行方差分析,所得数据见表6。计算各因素的F值并比较显著性水平发现,各影响因素对于扩展度和抗压强度的主次顺序与极差分析结果相一致。在确定最优组合时选取显著因素的优水平,以抗压强度为主要评价指标最佳组合为 $A_2B_2C_3$ 。

表5 试验结果极差分析

Table 5 Range analysis of the test results

极差分析	扩展度/mm			扩展时间/s			28 d 抗压强度/MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
y_{1i}	60	155	145	13.2	9.9	9.9	15.4	10.3	14.4
y_{2i}	130	105	135	10.5	11.4	10.7	28.1	28.8	18.4
y_{3i}	155	85	65	9.8	12.2	12.9	15.4	19.8	26.1
y_{1i}	20.0	51.7	48.3	4.4	3.3	3.3	5.1	3.4	4.8
y_{2i}	43.3	35.0	45.0	3.5	3.8	3.6	9.4	9.6	6.1
y_{3i}	51.7	28.3	21.7	3.3	4.1	4.3	5.1	6.6	8.7
R_j	31.7	23.3	26.7	1.1	0.8	1.0	4.2	6.2	3.9

表6 试验结果方差分析

Table 6 Variance analysis of the test results

指标	方差来源	偏差平方和	自由度	均方和	F 值	临界值	显著性水平 α
扩展度	A	1 616.67	2	808.33	32.33	$F_{0.01}(2,2) = 99$	0.05
	B	866.67	2	433.33	17.33	$F_{0.05}(2,2) = 19$	0.10
	C	1 266.67	2	633.33	25.33	$F_{0.10}(2,2) = 9$	0.05
	误差	50.00	2	25.00	—	$F_{0.25}(2,2) = 3$	—
	总和	3 800.00	8	475.00	—	—	—
抗压强度	A	35.84	2	17.92	11.10	$F_{0.05}(2,2) = 19$	0.10
	B	57.06	2	28.53	17.67	$F_{0.10}(2,2) = 9$	0.10
	C	23.58	2	11.79	7.30	$F_{0.25}(2,2) = 3$	0.25
	误差	3.23	2	1.61	—	—	—
	总和	119.70	8	14.96	—	—	—

3 疲劳性能

选定水胶比 0.26, 保持胶凝材料总质量、粉煤灰、粗细集料及减水剂用量不变, 研究 nano-SiO₂ 颗粒及硅灰掺量(胶凝材料质量百分数)变化对自密实混凝土弯曲疲劳性能的影响. 所选四种配合比分别编号 S00、

S01、S11 和 S21, 各组试件配合比及 60 d 弯拉强度测试结果见表 7, 保持硅灰掺量为胶凝材料总量的 10%, 弯拉强度随 nano-SiO₂ 掺量增加而表现出先增大后减小的趋势, S11 组试件 60 d 弯拉强度高达 8.92 MPa, 较 S00、S01、S21 三组分别提高了 20.1%、13.6% 和 7.0%.

表7 各配合比混凝土 60d 弯拉强度测试结果

Table 7 Sixty-day flexural strength of tested concrete with various mix proportions

编号	质量比						高效减水剂/%	60 d 弯拉强度/MPa	
	胶凝材料				水	细集料			粗集料
	UFA	C	NS	SF					
S00	0.8	0	0	0.2	0.26	1.39	1.68	1.5	7.43
S01	0.7	0	0.1	0.2	0.26	1.39	1.68	1.5	7.85
S11	0.69	0.01	0.1	0.2	0.26	1.39	1.68	1.5	8.92
S21	0.68	0.02	0.1	0.2	0.26	1.39	1.68	1.5	8.34

各配合比混凝土试件不同应力水平下四点弯曲疲劳寿命测试结果按小到大顺序排列见表 8. 水泥混凝土是一种准脆性材料, 疲劳寿命在重复荷载作用下具有较大离散性, 通常采用两参数 Weibull 分布对数据进行处理^[19-20]. 将表 8 中疲劳试验结果取自然对

数, 按式(1)计算对应的存活率 p , 并按式(2)对其倒数取二次自然对数. 拟合各配合比混凝土不同应力水平下 $\ln(\ln(1/p)) - \ln N$ 曲线见图 1, 从而得到相应的 Weibull 分布参数见表 9.

表8 各配合比混凝土不同应力水平下疲劳试验结果

Table 8 Fatigue life of tested concrete with various mix proportions at different stress levels

编号	应力水平	疲劳寿命 N /次					
	S_{\max}	试件 1	试件 2	试件 3	试件 4	试件 5	试件 6
S00	0.6	46 209	87 616	134 264	201 944	285 845	381 903
	0.65	9 216	21 021	33 285	48 474	73 206	121 065
	0.7	2 031	3 927	7 924	15 238	25 721	48 967
	0.75	656	1 496	3 021	4 533	7 254	12 416
S01	0.6	121 175	201 704	259 184	329 328	412 784	539 283
	0.65	24 196	43 553	69 537	90 423	120 145	176 243
	0.7	5 724	10 893	18 041	26 779	41 581	51 213
	0.75	3 043	4 316	6 525	9 437	12 088	18 124
S11	0.6	219 315	343 021	420 921	501 269	576 401	684 721
	0.65	52 956	80 283	121 031	141 759	180 478	201 342
	0.7	14 063	23 448	34 013	45 761	56 061	78 156
	0.75	7 274	9 051	13 420	15 684	18 091	24 313
S21	0.6	154 155	215 783	318 019	391 693	450 218	579 618
	0.65	31 071	56 029	79 294	129 627	142 655	189 611
	0.7	7 596	15 048	26 077	35 104	47 411	62 102
	0.75	3 507	5 172	9 289	12 401	15 062	20 479

表9 混凝土不同应力水平下的 Weibull 分布参数

Table 9 Weibull coefficients of tested concrete under different stress levels

编号	应力水平 S_{\max}	c	N_a /次
S00	0.6	1.173	225 684
	0.65	1.001	59 870
	0.7	0.769	19 007
	0.75	0.858	5 638
S01	0.6	1.722	365 390
	0.65	1.283	103 885
	0.7	1.103	30 614
	0.75	1.376	10 538
S11	0.6	2.244	529 190
	0.65	1.794	152 786
	0.7	1.48	49 695
	0.75	2.038	17 012
S21	0.6	1.869	411 778
	0.65	1.354	125 299
	0.7	1.178	38 706
	0.75	1.364	13 107

图1中各配合比混凝土在应力水平0.6~0.7对应的拟合曲线之间均存在较大间距,表明相应疲劳寿命随应力水平增长变化幅度较大,研究两者关系时应力水平应进一步细分.图2对比了形状参数 c 随应力水平增长的变化趋势,发现各组试件疲劳寿命离散性在应力水平增大过程中均表现出先增大后减小的趋势,且均在应力水平0.7时达到最大.就整体而言,各组试件疲劳寿命离散性从小到大依次为S11,S21,S01,S00,表明nano-SiO₂及硅灰颗粒的掺入在一定程度上降低了不同应力水平下自密实混凝土疲劳寿命的离散性.

$$p = 1 - \frac{i}{n+1}. \quad (1)$$

$$\ln(\ln(1/p)) = \ln\left(\left(\frac{N_p}{N_a}\right)^c\right) = c \ln N_p - c \ln N_a. \quad (2)$$

式中: p 为存活率; i 为疲劳寿命小到大排列的序数; n 为每组试件的样本数, $n=6$; c 为形状参数,是 $\ln(\ln(1/p))-\ln N$ 曲线的斜率, c

越大混凝土弯曲疲劳寿命离散性越小; N_p 为存活率为 p 时的疲劳寿命; N_a 为特征寿命,

$p = 0.368$ 对应的疲劳寿命.

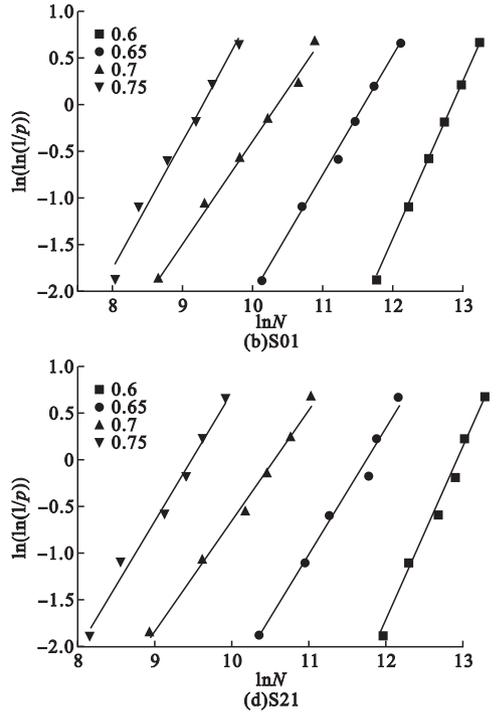
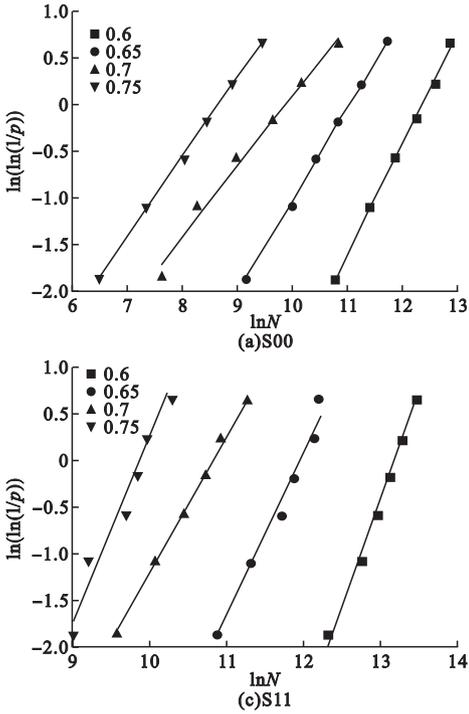


图1 各配合比混凝土不同应力水平下 $\ln(\ln(1/p)) - \ln N$ 曲线

Fig. 1 $\ln(\ln(1/p)) - \ln N$ curve of tested concrete with various mix proportions at different stress levels

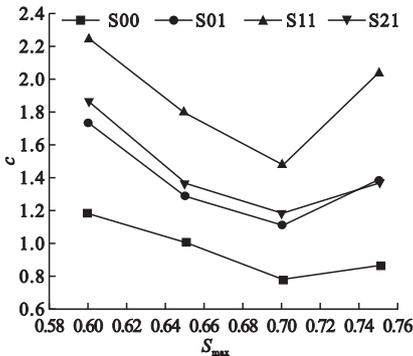


图2 形状参数与应力水平之间的关系

Fig. 2 The relationship between the shape parameter and stress level

按式(3)分别计算各组混凝土在不同应力水平与存活率下的预估疲劳寿命,拟合 $S-p-N$ 曲线如图3,得到式(4)所示双对数概率疲劳方程,相关参数见表10.由表10可知,相关系数均在0.94以上,线性拟合相关性较好,参数 a 均随 nano-SiO₂ 颗粒掺量的增大而呈先增大后减小变化趋势,在掺量为1%取得最大值,表明 S11 组试件疲劳性能最优,

较其余三组提升了3.4%~14.1%;参数 b 变化趋势与参数 a 基本相同, S11 组试件较其余三组增大了2.1%~9.8%,表明 nano-SiO₂ 颗粒存在降低了混凝土疲劳寿命对应力水平变化敏感性.预估疲劳寿命为 2×10^6 时,在存活概率50%和95%两种情况下, S11 组试件的弯拉强度折减系数均最大且达到0.544和0.510,较其余三组高出1.4%~5.7%.

$$N_p = \exp \left\{ \frac{\ln(\ln(\frac{1}{p})) - c \ln N_a}{c} \right\}. \quad (3)$$

$$\lg S = \lg a - b \lg N. \quad (4)$$

式中: S 为最大应力水平; a 、 b 分别为 $S-N$ 曲线在坐标轴上的截距和斜率,参数 a 反映疲劳曲线的高低, a 越大曲线越高,混凝土弯曲疲劳性能越好,参数 b 反映疲劳曲线的倾斜程度, b 越大曲线越陡,混凝土疲劳寿命随应力变化越不敏感^[21], N 为疲劳寿命.

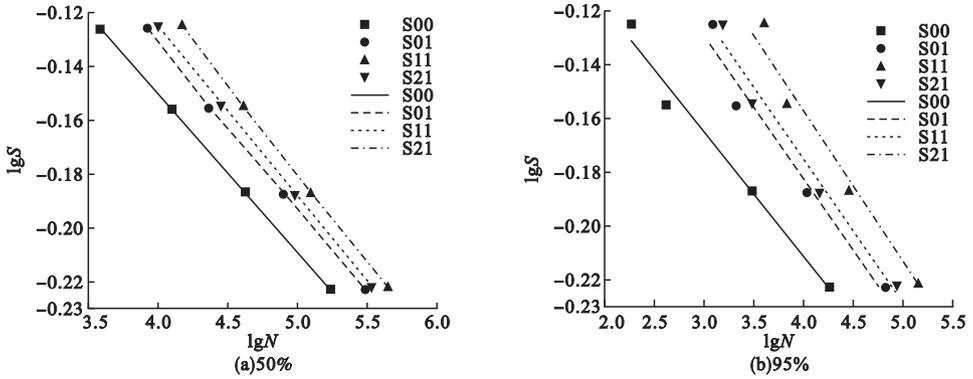


图3 不同存活率下混凝土 S-p-N 曲线

Fig. 3 S-p-N curves of concrete under different survival probabilities

表10 混凝土疲劳方程参数

Table 10 Coefficients of fatigue equation of concrete

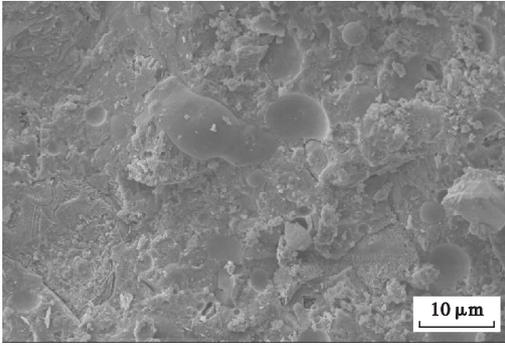
p/%	编号	a	b	R ²	lg(2.0 × 10 ⁶)	强度折减系数
50	S00	1.213 7	0.058 7	0.999 9	6.301	0.518
	S01	1.300 0	0.061 5	0.998 3	6.301	0.533
	S11	1.385 8	0.064 4	0.999 3	6.301	0.544
	S21	1.339 7	0.063 1	0.999 6	6.301	0.536
95	S00	0.937 2	0.045 8	0.971 8	6.301	0.483
	S01	1.067 0	0.052 6	0.946 2	6.301	0.497
	S11	1.198 8	0.058 9	0.956 0	6.301	0.510
	S21	1.089 9	0.053 3	0.969 4	6.301	0.503

4 SEM 微观形貌分析

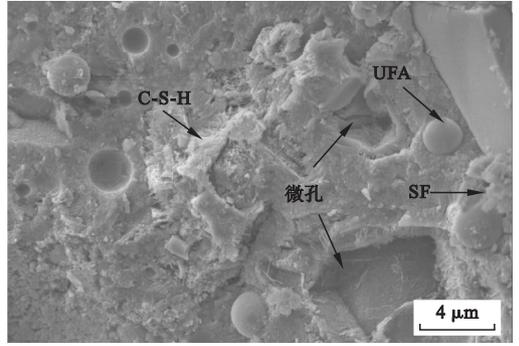
为进一步探究 nano-SiO₂ 颗粒对自密实道路混凝土疲劳性能的影响,在超细粉煤灰、硅灰掺量相同情况下,选取 S01、S11 两种配合比混凝土疲劳破坏试件断裂面处试样进行 SEM 微观形貌观测,结果见图 4、图 5。如图 4 所示,在仅掺超细粉煤灰、硅灰情况下,水泥浆体内部存在部分微孔,超细粉煤灰颗粒呈球状且表面较为光滑,水化程度相对较低,硅灰颗粒散布于浆体中或部分吸附于粉煤灰颗粒周边,填充内部空隙。观察图 5 可以发现,掺入 1% nano-SiO₂ 后,粉煤灰颗粒表面变得较为粗糙,水化程度相对较高,与硅灰、纳米颗粒共同构筑多元胶凝体系;同时,不利水化产物六方板状 Ca(OH)₂ 晶体消耗减少,水

泥浆体内部生成较多水化硅酸钙凝胶吸附于粉煤灰表面甚至包裹粉煤灰颗粒,进一步填充内部微孔。

S11 配合比混凝土疲劳性能最优主要归功于适量 nano-SiO₂ 的存在,其可以进一步填充硅灰、粉煤灰颗粒间的空隙。填充效应主要分为两种:物理填充和化学填充。Nano-SiO₂ 凭借自身小粒径充当微集料进一步改善浆体内部孔结构,提高混凝土密实度,但这种物理填充颗粒量少且易发生团聚,仅能有效改善约 5% 的微孔; nano-SiO₂ 作为活化剂,加速矿物掺合料水化,改变界面过渡区 Ca(OH)₂ 取向程度,并与 Ca(OH)₂ 发生二次反应生成低密度水化硅酸钙凝胶,填充微孔结构而使得混凝土更加致密^[22-23]。



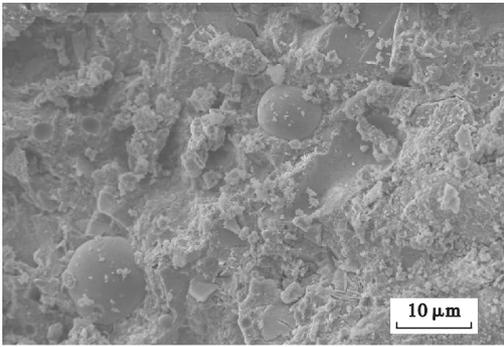
(a)2 000 倍



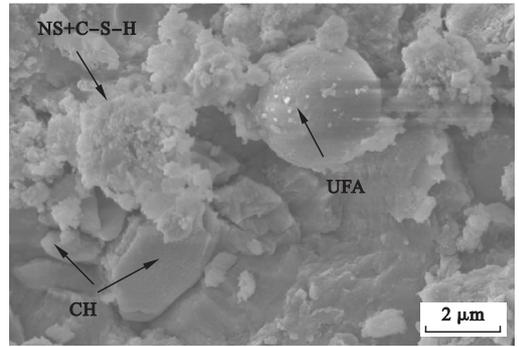
(b)5 000 倍

图4 S01 配合比混凝土 SEM 图

Fig. 4 SEM images of concrete with mix ratio S01



(a)2 000 倍



(b)10 000 倍

图5 S11 配合比混凝土 SEM 图

Fig. 5 SEM images of concrete with mix ratio S11

5 结 论

(1)以 28 d 抗压强度为主要指标,在填充性能满足要求条件下,结合极差分析和方差分析结果选定自密实混凝土水胶比 0.26,胶凝材料中保持粉煤灰掺量 20%,纳米二氧化硅和硅灰掺量分别为 1%、10%。

(2)采用两参数 Weibull 分布处理疲劳寿命数据时,相应的概率疲劳方程表明:S11 配合比试件即纳米二氧化硅掺量为 1% 时疲劳性能最优,且达到 2×10^6 预估疲劳寿命时弯拉强度折减系数最大,其疲劳寿命受应力水平变化影响相对最小。

(3)纳米二氧化硅本身及其与氢氧化钙发生二次水化反应生成的低密度水化硅酸钙凝胶填充内部微孔,改善结构致密程度,从而增大了自密实混凝土强度并改善了其疲劳性能。

参考文献

- [1] CHEN X D, LIU Z H, GUO S S, et al. Experimental study on fatigue properties of normal and rubberized self-compacting concrete under bending [J]. Construction and building materials, 2019, 205: 10–20.
- [2] HESAMI S, HIKOUEI I S, EMADI S A I. Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber [J]. Journal of cleaner production, 2016, 133: 228–234.
- [3] GAO X J, KAWASHIMA S, LIU X Y, et al. Influence of clays on the shrinkage and cracking tendency of SCC [J]. Cement and concrete composites, 2012, 34: 478–485.
- [4] 黄艳玲, 元强, 刘耀强, 等. 外加剂对半流动性自密实混凝土滑模施工性能的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33(增刊 1): 254–260. (HUANG Yanling, YUAN Qiang, LIU Yaoqiang, et al. Effect of additives on slip-form construction performance of semi-flowable self-compacting concrete [J]. Materials reports, 2019, 33 (S1): 254–260.
- [5] RAMADAN K Z, HADDAD R H. Self-healing of overloaded self-compacting concrete of rigid

- pavement [J]. European journal of environmental and civil engineering, 2017, 21 (1): 63 - 77.
- [6] LÓPEZ-CARREÑO R D, PUJADAS P, CAVALARO S H P, et al. Bond strength of white toppings and bonded overlays constructed with self-compacting high-performance concrete [J]. Construction and building materials, 2017, 153: 835 - 845.
- [7] JALAL M, POULADKHAH A, HARANDI O F, et al. Comparative study on effects of class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete [J]. Construction and building materials, 2015, 94: 90 - 104.
- [8] JALAL M, FATHI M, FARZAD M. Effects of fly ash and TiO₂ nanoparticles on rheological, mechanical, microstructure and thermal properties of high strength self compacting concrete [J]. Mechanics of materials, 2013, 61: 11 - 27.
- [9] NIEWIADOMSKI P, HOŁA J, ĆWIRZE Ń A. Study on properties of self-compacting concrete modified with nanoparticles [J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2018, 18: 877 - 886.
- [10] LIU R, XIAO H G, LIU J L, et al. Improving the microstructure of ITZ and reducing the permeability of concrete with various water/cement ratios using nano-silica [J]. Journal of material science, 2019, 54 (1): 444 - 456.
- [11] JALAL M, MANSOURI E, SHARIFIPOUR M, et al. Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO₂ micro and nanoparticles [J]. Materials and design, 2012, 34: 389 - 400.
- [12] BERNAL J, REYES E, MASSANA J, et al. Fresh and mechanical behavior of a self-compacting concrete with additions of nano-silica, silica fume and ternary mixtures [J]. Construction and building materials, 2018, 160: 196 - 210.
- [13] NANIZ O A, MAZLOOM M. Effects of colloidal nano-silica on fresh and hardened properties of self-compacting lightweight concrete [J]. Journal of building engineering, 2018, 20: 400 - 410.
- [14] GOEL S, SINGH S P, SINGH P. Flexural fatigue strength and failure probability of self-compacting fiber reinforced concrete beams [J]. Engineering structures, 2012, 40: 131 - 140.
- [15] GOEL S, SINGH S P. Fatigue performance of plain and steel fiber reinforced self compacting concrete using S-N relationship [J]. Engineering structures, 2014, 74: 65 - 73.
- [16] KORTE S, BOEL V, CORTE W D, et al. Static and fatigue fracture mechanics properties of self-compacting concrete using three-point bending tests and wedge-splitting tests [J]. Construction and building materials, 2014, 57: 1 - 8.
- [17] GANESAN N, BHARATI R J, SHASHIKALA A P. Flexural fatigue behavior of self compacting rubberized concrete [J]. Construction and building materials, 2013, 144: 7 - 14.
- [18] 黄春龙, 王栋民, 田红伟. 纳米二氧化硅影响水泥基材料流动性的研究综述 [J]. 材料导报, 2018, 32 (增刊 1): 458 - 461. (HUANG Chunlong, WANG Dongmin, TIAN Hongwei. Research progress of the effect of nano-silica on the fluidity of cement-based materials [J]. Materials reports, 2018, 32 (S1): 458 - 461.)
- [19] 寇佳亮, 赵坤龙, 张浩博. 高延性纤维混凝土拉压疲劳性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2018, 51 (9): 17 - 25. (KOU Jialiang, ZHAO Kunlong, ZHANG Haobo. Experimental study on tension and compression fatigue properties of high ductile fiber concrete [J]. China civil engineering journal, 2018, 51 (9): 17 - 25.)
- [20] 李北星, 尹立愿, 樊立龙. 机制砂混凝土抗弯曲疲劳性能研究 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (5): 801 - 807. (LI Beixing, YIN Liyuan, FAN Lilong. Analysis on flexural fatigue performance of manufactured sand concrete [J]. Journal of building materials, 2017, 20 (5): 801 - 807.)
- [21] 吕雁. 玻璃纤维混凝土弯曲疲劳性能及累积损伤研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012. (Lü Yan. Study on the flexural fatigue performance and cumulative damage of glass fiber reinforced concrete [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.)
- [22] 徐晶, 王先志. 纳米二氧化硅对混凝土界面过渡区的改性机制及其多尺度模型 [J]. 硅酸盐学报, 2018, 46 (8): 1053 - 1058. (XU Jing, WANG Xianzhi. Effect of nano-silica modification on interfacial transition zone in concrete and its multiscale modelling [J]. Journal of Chinese ceramic society, 2018, 46 (8): 1053 - 1058.)
- [23] 高英力, 何倍, 邹超. 纳米颗粒对道路粉煤灰混凝土耐磨性能的影响及作用机理 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37 (2): 441 - 448. (GAO Yingli, HE Bei, ZOU Chao. Effect and mechanism of nano-particles on wear resistance of road fly ash concrete [J]. Bulletin of Chinese ceramic society, 2018, 37 (2): 441 - 448.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)