

文章编号:1671-8879(2005)01-0001-05

## 硅粉路面混凝土的疲劳特性

陈忠达<sup>1</sup>, 梁 峰<sup>1</sup>, 刘根昌<sup>2</sup>, 戴经梁<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;  
2. 许昌市公路管理局, 河南 许昌 460001)

**摘 要:**为了研究硅粉混凝土的疲劳特性,以应力水平为 0.70~0.85 的疲劳试验为基础,采用双参数 Weibull 分布模型进行数据处理,建立了等效疲劳寿命预估方程和疲劳寿命预估方程,其中疲劳寿命预估方程能很好地反映不同应力级位对疲劳寿命的影响,同时与普通混凝土的疲劳性能进行了对比分析。结果表明,硅粉路面混凝土具有良好的疲劳性能,明显优于普通混凝土,在相同的荷载作用下,其疲劳寿命较普通混凝土提高 3~6 倍。

**关键词:**道路工程;路面混凝土;硅粉;抗折强度;疲劳;疲劳方程

**中图分类号:**U416.216 **文献标识码:**A

## Fatigue character of silicon-powder road concrete

CHEN Zhong-da<sup>1</sup>, LIANG Feng<sup>1</sup>, LIU Gen-chang<sup>2</sup>, DAI Jing-liang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Highway Administration of Xuchang City, Xuchang 460001, China)

**Abstract:** In order to adapt to modern transportation, this paper systematically studies the fatigue character of silicon-powder road concrete, adopts two-parameter Weibull distributed model to process data at the foundation of fatigue test in 0.75~0.8 stress level, establishes equivalence fatigue life forecasting equation and fatigue life forecasting equation. The fatigue life forecasting equation can react the different stress level's influence to fatigue life. Compared it with normal concrete's fatigue performance, the study shows silicon-powder concrete has good fatigue performance. Under the same load, its fatigue life is as 3~6 times as the one of normal concrete.

**Key words:** road engineering; road concrete; silicon-powder; folding strength; fatigue; fatigue equation

## 0 引 言

随着国民经济的发展,公路交通运输呈现出“大流量、重型化”的特点,这对水泥混凝土路面提出了新的要求。为了满足现代交通的要求,研制开发高性能路面混凝土是十分必要的。中国对高性能混凝土的研究始于 20 世纪 70 年代后期,而高性能混凝土主要应用于高层建筑和大跨径桥梁,在道路路面

中应用很少。随着对高性能混凝土重要性认识的提高,高性能混凝土应用已得到迅速的推广。提高混凝土使用性能的途径有许多,其中掺和矿物细掺料——硅粉是提高路面混凝土使用性能的有效途径之一。

本文在文献[1]的基础上,结合“重载交通水泥混凝土路面修筑技术研究”课题研究成果,系统介绍了硅粉路面混凝土的疲劳特性。

收稿日期:2003-08-09

作者简介:陈忠达(1956-),男,江苏无锡人,长安大学教授。



### 1 疲劳试验方案

试件为 15 cm×15 cm×55 cm 的小梁,分 6 批成型共 64 根梁。试验分静载试验和疲劳试验两部分,均采用三分点加载方式,以保证梁试件底面能有一段弯矩相等的均匀受拉区。疲劳试验在 MTS 850 试验机上进行,加载波形统一采用正弦波。依据大应力比小频率的加载频率原则,当应力水平  $S \geq 0.85$  时,荷载作用频率为 1 Hz;当  $S < 0.85$  时为 15 Hz,加载间隙时间为 0。循环特征值  $R$  为

$$R = S_{\min}/S_{\max} \tag{1}$$

式中:  $S_{\min}$ 、 $S_{\max}$  分别为作用在试件上的最小荷载和最大荷载(kN)。

疲劳试验的低高应力比参照车辆最小和最大荷载比,考虑温度应力大小确定<sup>[1]</sup>。水泥混凝土路面常规结构在一般行车荷载作用下的应力水平为 0.20~0.65。但随着交通运输业的发展,重载超载车辆的出现,当水泥混凝土路面板较薄时,行车荷载作用下的应力水平可超过 0.85,甚至可达到 1,而出现一次性荷载作用下的断板现象,即极限破坏。针对这种情况,本文疲劳试验采用应力水平范围为 0.70~0.85。

### 2 疲劳试验结果

根据正交试验结果<sup>[2]</sup>,硅粉混凝土的配合比见表 1。各批试件的抗折强度试验结果见表 2,抗折疲劳试验结果见表 3。

表 1 混凝土配合比

水胶比	水泥/ (kg·m <sup>-3</sup> )	硅粉/ (kg·m <sup>-3</sup> )	砂/ (kg·m <sup>-3</sup> )
0.43	330	15	621
5~10 mm 碎石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	10~30 mm 碎石/ (kg·m <sup>-3</sup> )	FDN 减水剂/ (kg·m <sup>-3</sup> )	
348	1 101	3.45	

表 2 平均抗折强度

批 号	I	II	III	IV	V	VI
强度/MPa	5.98	6.34	6.48	6.56	6.80	6.90

### 3 疲劳方程的建立

由疲劳试验结果看出,由于混凝土的不均质性、试验状况和强度变异的影响,使疲劳试验结果的离散性较为明显。为了最大限度地降低离散性对疲劳试验结果的影响,在数据处理时采用双参数 Weibull 分布模型。已有的研究表明,混凝土的

表 3 疲劳试验结果

低高应力比	应力水平	疲劳次数	低高应力比	应力水平	疲劳次数
0.08	0.70	420	0.08	0.90	32
		4 134			46
		11 552	0.20	0.75	2 809
		23 696			3 459
		38 604			3 611
		134 446			18 650
		265 274			21 755
	0.75	128		0.80	609
		292			781
		2 962			878
		3 541			12 823
		4 484	0.50	0.85	42
		6 900			293
		6 904		0.90	32
	0.80	26			35
		422	0.80	0.80	728
		555			838
		1 794			3 202
		3 885			7 540
		27			183 624
	0.85	127		0.85	19
		355			28
		1 237		0.90	17

疲劳寿命  $N$  和等效疲劳寿命  $N^{1-R}$  均服从双参数 Weibull 分布<sup>[3,4]</sup>。疲劳方程有两种形式  
等效疲劳寿命方程

$$\lg S = \lg a - b(1 - R)\lg N \tag{2}$$

疲劳寿命方程

$$\lg \bar{S} = \lg a - b\lg N \tag{3}$$

式中:  $a$ 、 $b$  为疲劳试验确定的系数;  $R$  为低高应力比,即  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ ;  $\sigma_{\max}$  为重复应力最大值;  $\sigma_{\min}$  为重复应力最小值。

以上两种形式的疲劳方程各有特点<sup>[5]</sup>。式(2)是挪威 Aas-Jacobson 首先在疲劳方程中引入一项低高应力比系数  $R$  后提出的。该式反映了混凝土的疲劳寿命随低应力提高而增加,并呈线性关系的规律。式(3)可以将  $S$  与  $R$  对疲劳寿命影响的叠加效应相近的等效应力水平合并,从而简化了数据处理的过程。

#### 3.1 等效疲劳寿命预估方程

等效疲劳寿命  $N^{1-R}$  服从双参数 Weibull 分布,即失效概率  $p$  满足

$$p = F(\bar{N}) = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{N}^m}{t_0}\right) \quad \bar{N} \geq 1, m, t_0 > 0 \tag{4}$$



式(4)可改写为

$$\ln \ln \frac{1}{1-p} = m \ln \bar{N} - \ln t_0 \tag{5}$$

式中: $m$ 、 $t_0$  分别为形状参数和尺度参数。

因此,利用既有全部试验结果来获取各应力级

位上的失效概率  $p$ ,计算  $\ln \bar{N}$  值,并对数据进行回归分析,如图 1 所示。由此可以看出, $\ln \bar{N}$  与  $\ln \ln \frac{1}{1-p}$  存在较好的线性关系,且相关系数较高。

将回归系数  $m$ 、 $\ln t_0$  代入式(5),经计算,得到各

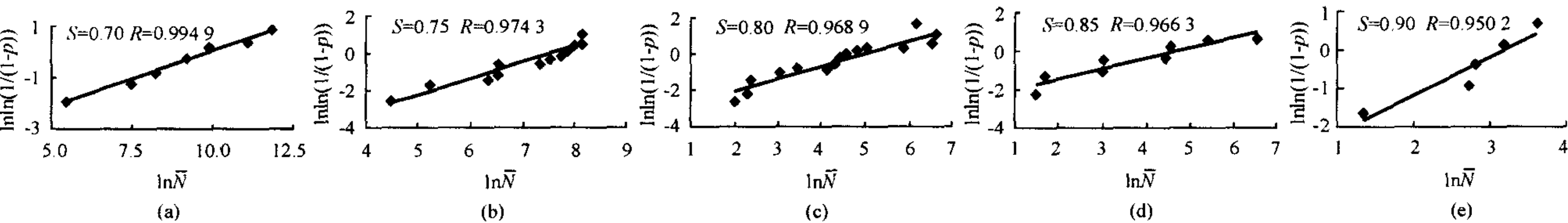


图 1 等效疲劳寿命 Weibull 分布检验

应力水平上相应于不同失效概率  $p$  的等效疲劳寿命  $\bar{N}$ ,如表 4、表 5 所示。

表 4 等效疲劳寿命  $\bar{N}$  回归分析结果

应力水平 $S$	回归系数 $m$	回归系数 $\ln t_0$	相关系数 $R$
0.70	0.469 5	4.713 7	0.994 9
0.75	0.838 3	6.360 4	0.974 3
0.80	0.676 5	4.063 4	0.968 9
0.85	0.523 1	2.453 4	0.966 3
0.90	1.049 4	3.343 6	0.950 2

表 5 等效疲劳寿命  $\bar{N}$  与失效概率  $p$  的关系

失效概率 $p$	应力水平 $S$				
	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70
0.05	1	2	5	57	41
0.10	3	3	15	135	190
0.15	4	4	27	226	478
0.20	6	6	44	330	939
0.25	7	10	64	446	1 613
0.30	9	15	88	577	2 550
0.35	11	22	117	722	3 813
0.40	13	30	150	885	5 481
0.45	16	41	190	1 068	7 663
0.50	17	54	236	1 274	10 500

从图 1 可以看出, $\ln \bar{N}$  与  $\ln \ln(1/(1-p))$  的线性关系良好,相关系数亦较高。这说明等效疲劳寿命  $\bar{N}$  服从双参数 Weibull 分布,即失效概率服从式(5),所以可以利用此分布模型建立疲劳方程。<sup>[6]</sup>

根据表 5 可建立不同失效概率下的疲劳方程,不同失效概率下疲劳方程的回归系数及相关系数如表 6 所示。其中 20%、50% 失效概率( $p = 0.2$  和  $p = 0.5$ ) 的疲劳方程如图 2 所示。

表 6 不同失效概率下的疲劳方程回归系数

失效概率 $p$	回归系数 $a$	回归系数 $b$	相关系数 $R$
0.05	0.884 7	0.052 0	0.943 7
0.10	0.919 8	0.047 6	0.959 1
0.15	0.928 5	0.043 3	0.969 6
0.20	0.943 2	0.042 1	0.974 5
0.25	0.955 7	0.041 5	0.986 4
0.30	0.967 4	0.041 1	0.990 6
0.35	0.977 2	0.040 7	0.994 0
0.40	0.984 5	0.040 1	0.995 6
0.45	0.991 1	0.039 5	0.996 9
0.50	0.995 9	0.038 9	0.997 2

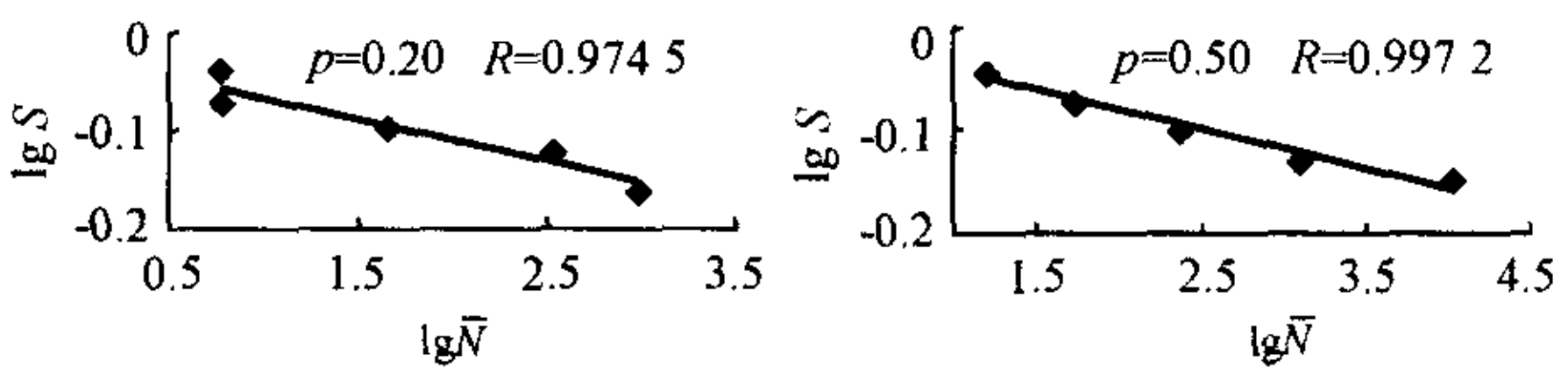


图 2 两种失效概率下的等效疲劳寿命预估方程

失效概率为 50% 的疲劳方程为

$$\lg S = \lg 0.995\ 9 - 0.038\ 9(1-R)\lg N \tag{6}$$

3.2 疲劳寿命预估方程

等效疲劳寿命预估方程不能反映高低应力水平,或者说不能反映应力级位不同对疲劳方程的影响,即不能反映不同级位轴载对路面疲劳损坏作用程度上的差异。但通过变量的变换,将等效应力水平引入疲劳方程可以实现上述目的,即采用式(3)的疲劳方程,式(3)可表示为

$$\lg \frac{S(1-R)}{1-SR} = \lg a - b \lg N \tag{7}$$

将荷载应力  $\sigma_p$  和温度翘曲应力  $\sigma_t$  代入式(7) 中的  $S$  和  $R$ ,即取  $\sigma_{\min} = \sigma_t$ 、 $\sigma_{\max} = \sigma_p + \sigma_t$ ,则式(7) 可改写为

$$\lg \frac{\sigma_p}{f_{cm} - \sigma_t} = \lg a - b \lg N \tag{8}$$



同样应用双参数 Weibull 分布模型建立疲劳方程。等效应力水平如表 7 所示。为了简化数据处理的过程,对等效应力水平进行对数运算,并对对数值相近的点进行合并。其 Weibull 回归分析结果如表 8 所示。

表 7 等效应力水平  $\bar{S}$  值检验

S	R		
	0.08	0.20	0.50
0.90	0.892	0.878	0.818
0.85	0.839	0.819	0.739
0.80	0.786	0.762	0.667
0.75	0.734	0.706	—
0.70	0.682	—	—

表 8 等效应力水平下疲劳寿命回归分析结果

$\lg \bar{S}$	回归系数 $m$	回归系数 $\ln t_0$	相关系数 $R$
-0.050	4.140 6	15.264 0	0.842 1
-0.076	0.521 1	3.199 0	0.999 0
-0.087	0.521 3	2.557 4	0.962 2
-0.105	0.452 3	3.297 6	0.974 9
-0.118	0.470 5	3.892 9	0.796 1
-0.131	0.394 4	3.078 0	0.956 3
-0.151	0.775 7	7.301 1	0.876 2
-0.166	0.432 0	4.713 8	0.994 8
-0.176	0.352 0	3.447 0	0.893 6

不同失效概率下的疲劳寿命  $N$  如表 9 所示。同样分别给出失效概率  $p=0.2$  和  $p=0.5$  的疲劳方程,如图 3 所示。

不同失效概率下疲劳方程的回归系数如表 10 所示。其中失效概率为 50% 的疲劳方程为

$$\lg \frac{S(1-R)}{1-SR} = \lg 1.0179 - 0.0421 \lg N \quad (9)$$

表 9 不同失效概率下的疲劳寿命  $N$

失效概率 $p$	$\lg \bar{S}$								
	-0.050	-0.076	-0.087	-0.105	-0.118	-0.131	-0.151	-0.166	-0.176
0.05	19	2	1	2	7	1	266	57	4
0.10	23	6	2	10	33	8	673	300	30
0.15	26	14	4	26	82	24	1 176	817	103
0.20	28	26	8	53	162	55	1 770	1 702	253
0.25	30	42	12	93	278	104	2 456	3 064	520
0.30	31	64	19	150	438	180	3 240	5 040	957
0.35	33	92	27	228	655	290	4 132	7 802	1 636
0.40	34	128	37	332	940	446	5 148	11 576	2 655
0.45	35	173	50	470	1314	665	6 305	16 660	4 151
0.50	37	229	67	652	1 799	968	7 630	23 463	6 319

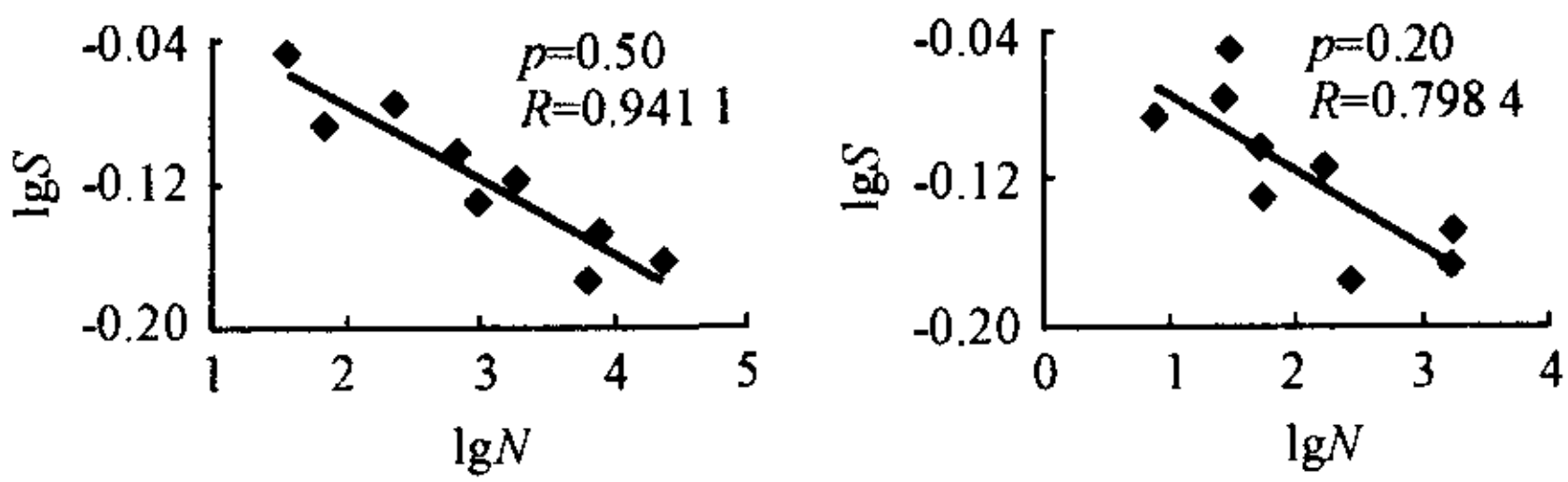


图 3 两种失效概率下的疲劳寿命预估方程

表 10 不同失效概率下的疲劳方程回归系数

失效概率 $p$	回归系数 $a$	回归系数 $b$	相关系数 $R$
0.05	0.788 5	0.017 4	0.342 6
0.10	0.844 5	0.031 6	0.600 2
0.15	0.889 0	0.037 8	0.719 9
0.20	0.927 7	0.041 8	0.798 4
0.25	0.952 1	0.043 0	0.844 9
0.30	0.974 1	0.043 8	0.880 6
0.35	0.989 7	0.043 8	0.903 1
0.40	1.000 9	0.043 3	0.919 8
0.45	1.010 0	0.042 7	0.932 2
0.50	1.017 9	0.042 1	0.941 1

4 疲劳特性分析

为了比较硅粉路面混凝土与普通路面混凝土的疲劳性能,通过对疲劳方程对比分析,得出相同应力水平下不同疲劳方程对应的疲劳寿命,并且可以得到在相同最大轴载作用下,不同疲劳方程对应的疲劳寿命<sup>[7]</sup>。两种混凝土的疲劳方程如图 4 所示。

从图 4 可以看出:当应力水平为 0.7 左右时,两种混凝土的疲劳寿命接近,但由疲劳方程的斜率可知在低应力水平条件下,硅粉路面混凝土的疲劳寿命优于普通混凝土;但当应力水平为 0.9 时,普通混凝土的疲劳寿命略优于硅粉路面混凝土<sup>[8]</sup>。硅粉路面混凝土虽然在高应力水平表现不如普通路面混凝土,但是由于两种混凝土的抗折强度不同,简单地比较同一应力水平下,混凝土的疲劳寿命不符合实际应用情况。因此需要比较相同荷载下,疲劳寿命的不同,其结果如表 11 所示,其中抗折强度如表 12 所示。

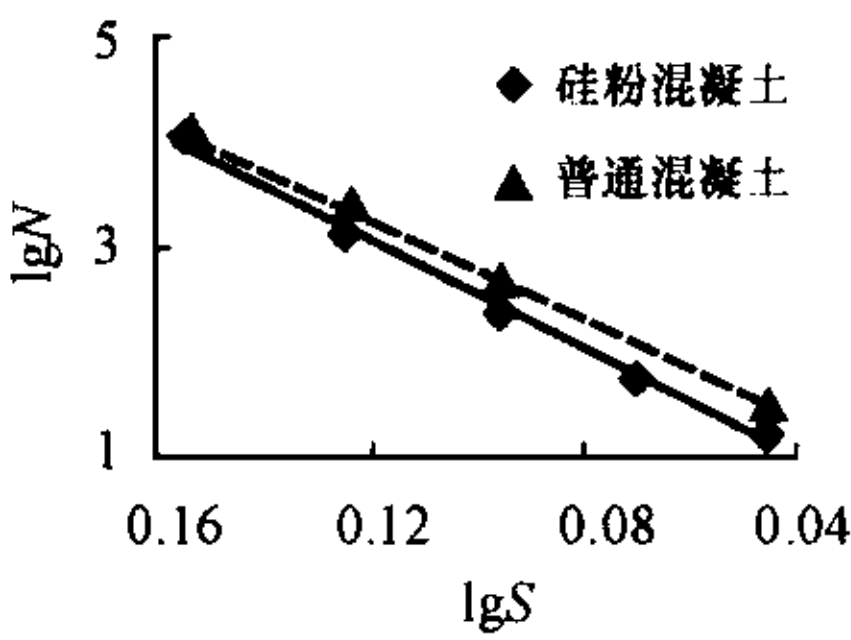


图 4 疲劳性能比较

表 11 等效疲劳寿命对比

最大荷载/kN	35.0	30.0	27.5	25.0
硅粉混凝土	4 697	247 077	2 313 456	26 812 701
普通混凝土	1 278	49 308	387 593	3 708 908



表 12 混凝土的抗折强度

混凝土种类	硅粉混凝土	普通混凝土
抗折强度/MPa	6.51	6.08

注:普通混凝土的水泥用量为 400 kg·m<sup>-3</sup>。

从表 11 可知,在相同荷载作用下,硅粉路面混凝土的疲劳寿命明显优于普通混凝土。

5 结 语

本文结合“重载交通水泥混凝土路面修筑技术研究”课题,系统研究了硅粉路面混凝土的使用性能,但仅介绍了硅粉路面混凝土的疲劳特性。通过弯曲疲劳试验,建立了两种形式的疲劳方程(等效疲劳寿命和疲劳寿命),并与普通路面混凝土的疲劳性能进行对比分析。研究表明硅粉路面混凝土具有良好的疲劳性能,在最大荷载 35 kN 下,其等效疲劳寿命为 4 697,在相同的荷载作用下,其疲劳寿命较普通混凝土提高 3~6 倍,能适应大流量、重轴载的现代交通的要求。本文的研究成果对硅粉路面混凝土的推广应用奠定了一定的基础。

参考文献:

References:

[1] 孙家伟. 贫混凝土基层混凝土路面研究[D]. 西安:长安大学,2001.  
SUN Jia-wei. Research of concrete pavement with lean concrete base[D]. Xi'an: Chang'an University,2001.

[2] 梁 峰. 高性能路面混凝土配合比设计及路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2002.

LIANG Feng. Match ratio design of super pavement concrete and research of it's performance[D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.

[3] Galloway J W. Effect of rate of loading on flexural strength and fatigue performance of concrete[R]. TRRL Report, No LR547,1973. 187-192.

[4] Thomas T C. Fatigue of plain concrete[J]. ACI Journal, 1981,78(4):292-304.

[5] 石小平,姚祖康,李 华,顾敏浩. 水泥混凝土的弯拉疲劳特性[J]. 土木工程学报,1990,23(3):56-61.  
SHI Xiao-ping, YAO Zu-kang, LI Hua, GU Min-hao. The flexural-tensile fatigue property of concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1990,23(3):56-61.

[6] 汪荣鑫. 数理统计[M]. 西安:西安交通大学出版社,1986.  
WANG Rong-xin. Mathematic statistics [M]. The Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.

[7] 孙廷选,陈忠达. 硅粉路面混凝土强度特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2004,24(4):10-13.  
SUN Ting-xuan, CHEN Zong-da. Strength character of silicon-powder road concrete[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2004,24(4):10-13.

[8] 蒋应军,戴经梁,陈忠达. 重载水泥混凝土路面疲劳方程和车辆轴载的换算[J]. 长安大学学报(自然科学版),2002,22(3):21-24.  
JIANG Ying-jun, DAI Jing-liang, CHEN Zhong-da. Fatigue equation and axle load conversion for cement-concrete-pavement under heavy-load [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2002, 22(3):21-24.

《长安大学学报》(自然科学版)2005 年征订通知

《长安大学学报》(自然科学版)系中华人民共和国教育部主管,长安大学主办的学术性双月刊,她在中国乃至世界范围内的公路交通科技领域具有广泛的影响,她是中国期刊方阵“双效”期刊,国务院学位委员会、国家教育部学位与研究生教育中文重要期刊,《中文核心期刊要目总览》(第四版)鉴定的中国公路运输类核心期刊,中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),Ei(Page One 数据库)固定刊源,国际道路科研信息(IRRD)书目文献数据库固定刊源,中国道路文献服务中心(CRDS)核心报道期刊,自 1981 年创刊以来多次获国家交通部和陕西省奖励。

《长安大学学报》(自然科学版)以繁荣公路交通科技为己任,促进公路交通科技交流和转化。她主要刊载道路工程、桥梁工程、交通工程、隧道工程、汽车工程、筑路机械、交通控制、交通运输管理、基础学科等具有国内先进水平的论文,同时刊载公路交通科技动态方面的简要评述和通讯。

《长安大学学报》(自然科学版)的主要读者对象为大专院校师生、公路交通科研人员、公路交通管理决策人员、公路交通领域的勘测、设计和施工单位的技术人员。

《长安大学学报》(自然科学版)全年 6 期,大 16 开本,112 页,欢迎订阅,各地读者可在当地邮局订阅,每期定价 10.00 元,全年定价 60.00 元。

地 址:西安市南二环路中段,《长安大学学报》(自然科学版)编辑部

电 话:(029)82334383

国内邮发代号:52-137

国外发行代号:BM5720

邮政编码:710064

E-mail:xuebao@chd.edu.cn