

钢纤维掺量对混凝土抗拉疲劳性能影响的试验研究

张志彪¹, 郭蒙蒙², 朱茹琳³, 冯仲仁⁴

(1. 安徽省水利水电勘测设计院, 安徽 合肥 230000; 2. 安徽省高路建设有限公司;
3. 安徽保利房地产开发有限公司; 4. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院)

摘要:当前混凝土材料疲劳问题突出,钢纤维混凝土疲劳研究更是少之又少,为研究钢纤维混凝土(SFRC)构件在重复荷载作用下的疲劳性能,该文利用电液伺服材料试验机,通过4种钢纤维体积率、每种8个应力水平的SFRC试件单轴疲劳试验研究,对试验数据进行回归处理,得出了较高疲劳强度对应的钢纤维合理体积率,拟合得到S-N疲劳寿命曲线,并推导出考虑钢纤维体积率的SFRC材料疲劳方程。试验结果表明:钢纤维体积率1.0%时,SFRC材料的疲劳强度为0.775 1 MPa,较普通混凝土增大19.59%,疲劳强度增幅很大且体积率合理,因此实际工程中承受疲劳荷载的钢纤维混凝土构筑物,在其他力学性能亦满足要求的情况下,选取合理体积率1.0%即可,疲劳应力也可根据文中疲劳方程计算。

关键词:钢纤维混凝土; 疲劳试验; 体积率; 疲劳寿命曲线; 疲劳方程

1 引言

当前混凝土构件承受的荷载类型越来越复杂,钢纤维混凝土凭借良好的力学性能越来越多地被使用,但钢纤维混凝土(SFRC)构件的疲劳及损伤性能研究已不能满足工程项目的需求。

近些年各国学者对SFRC疲劳问题主要做了以下研究。S. Goel 和 S. P. Singh 通过普通混凝土梁及SFRC梁弯曲疲劳试验,研究了钢纤维对试验梁疲劳性能的影响;Germano F 通过2种钢纤维体积率及3个不同荷载水平试验,表明钢纤维可改善混凝土的疲劳寿命;Parvez Ahasn 通过12根不同钢纤维含量的钢筋混凝土梁弯曲疲劳试验,表明SFRC构件大大提高了抗疲劳性能和抗裂纹扩展性能,降低了梁的跨中挠度,减小了受拉纵筋应力水平;Ruiz Gonzalo 通过4

种加载频率的SFRC立方体试块受压疲劳试验,表明钢纤维通过抑制低频循环加载作用时裂纹扩展速率,提高了混凝土疲劳性能;MG Girish 设计了SFRC在循环荷载作用下的疲劳试验,得到了相关的S-N曲线;杨润年通过SFRC梁弯曲疲劳试验,得到疲劳荷载作用下的本构模型及损伤演化模型;高丹盈通过8根钢纤维高强混凝土梁疲劳试验,表明掺入钢纤维可以抑制裂纹的扩展;方志通过不同钢纤维掺入量SFRC单轴等幅受压疲劳试验,得到体积率为1.5%和3%时试件剪切破坏,表明钢纤维改善了混凝土的疲劳性能;侯蔚峰通过多种钢纤维掺入量的SFRC梁弯曲静载试验以及循环往复加载试验,研究了SFRC梁的弯曲疲劳特性;李书群通过不同应力比下的SFRC梁的弯曲疲劳试验,作出不同应力比下的S-N曲线;石北啸通过不同钢纤维体积率的混凝土疲劳试验,表明钢纤维体积率在某一临界值以内时,SFRC的疲劳性能随

[13] 宋云连,吕鹏,张扬. 温拌沥青混合料高温性能试验研究[J]. 公路工程,2018(5).

[14] 苏红亮. 橡胶沥青混合料的低温抗裂性研究[J]. 山东交通科技,2016(5).

[15] 王宇. 沥青路面再生研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2011.

[16] 隆然,马启和. 橡胶粉改性沥青混合料疲劳性能研究[J]. 公路工程,2015(2).

[17] 王明刚,孙静. 再生沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路,2019(1).

[18] 曾哲,刘星,罗蓉,等. 空隙率对透水沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路,2019(6).

收稿日期:2020-07-10(修改稿)

作者简介:张志彪,男,硕士,工程师. E-mail:773867585@qq.com

着钢纤维体积率的增加而明显提高;冯仲仁等的研究表明:钢纤维混凝土的疲劳性能明显高于普通混凝土,其疲劳强度较普通混凝土提高 20%左右。

该文设计 SFRC 试件的单轴疲劳试验,研究钢纤维合理体积率取值,并推导考虑钢纤维体积率的 SFRC 疲劳方程。

2 试验状况

2.1 试件设计

浇筑试件选取设计强度等级 C30 的普通混凝土,

掺入不同体积率的钢纤维(0,0.5%,1.0%,1.5%),SFRC 材料的配合比为:水泥:水:粉煤灰:河砂:碎石=1:0.41:0.27:1.84:2.36。其他要求见表 1。

试验试件为长×宽×高=300 mm×100 mm×100 mm 的棱柱体,见图 1,中间部分为试验实际测试部位。在试件两端分别预埋一根 $\phi 14$ 的钢筋,伸入端部 100 mm,控制两端预埋钢筋严格对中,浇筑成型的 SFRC 试件见图 2。SFRC 试件表面粘贴应变计,用以测量循环加载时试件的应变。同一批 SFRC 浇筑 5 个边长 15 cm 的标准立方体试块,用来检测同批次棱柱体试件是否满足要求。

表 1 SFRC 材料要求

水泥	水灰比	砂		粉煤灰	碎石/mm	钢纤维
		砂率/%	细度模数			
华新 P II 32.5	0.41	32	2.6~2.9	I 级	4.75~19	端钩型

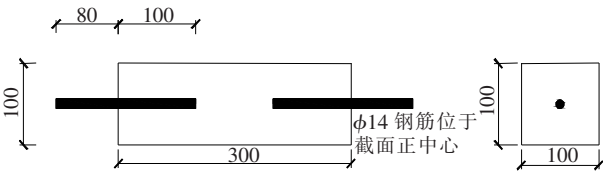


图 1 SFRC 试件尺寸(单位:mm)



图 2 SFRC 试件

2.2 试验设备

疲劳试验采用电液伺服万能材料试验机加载装置,量测采用 DH5908 动应变测试系统。疲劳试验机配套计算机动态采集荷载和变形,DH5908 动态应变测试系统采集应变。

试件安装形式见图 3。

2.3 试验加载工况

单轴疲劳试验采用 4 种钢纤维体积率,8 个应力水平正弦加载,进行单轴受拉循环疲劳试验,加载工况见表 2。

试验试件数量为每一应力水平下对 6 个试件进行试验,初步试验结束后复核试件个数,对不满足最小试



图 3 SFRC 试件安装

表 2 单轴疲劳试验加载工况

钢纤维体 积率/%	最小应力/ MPa	最大应力/ MPa	试件个 数/个	加载频 率/Hz
0	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.30f_{tk}(0.6)$	6	10
	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.35f_{tk}(0.7)$	6	10
	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.40f_{tk}(0.8)$	6	10
0.5	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.45f_{tk}(0.9)$	6	10
1.0	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.50f_{tk}(1.0)$	6	10
1.5	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.55f_{tk}(1.1)$	6	10
	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.60f_{tk}(1.2)$	6	10
	$0.1f_{tk}(0.2)$	$0.65f_{tk}(1.3)$	6	10

验个数的应力水平进行补测。为研究不同钢纤维体积率的混凝土疲劳性能,试验荷载最小应力水平应取 $0.1f_{tk}$ 即 0.2 MPa,最大应力水平由 0.6 MPa 递加至 1.3 MPa,单次递增 0.1 MPa。若试件在达到 1×10^6 次循环周期后没有破坏,则认为在此加载工况作用下,

试件具有无限疲劳寿命。

3 试验结果分析

3.1 试件破坏形态

图 4 为 SFRC 试件破坏断面 SEM 扫描电镜图,图 5 为 SFRC 试件破坏形态。

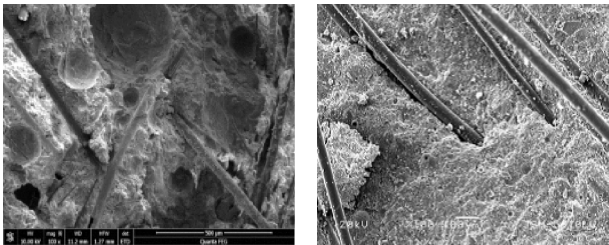


图 4 SEM 扫描电镜图

由图 4、5 可以看出:SFRC 试件在疲劳荷载作用下,沿试件中间位置发生断裂破坏。破坏发生前几秒钟,试件表面出现细微裂纹,随之发生断裂破坏,伴随有钝音。断裂面不规整,断裂面两侧混凝土无明显破坏损伤,断裂的形式主要是粗骨料拉断破坏及粗骨料与水泥砂浆界面分离破坏,钢纤维基本都是拔出剥离,极少断裂破坏。



图 5 试件破坏形态

3.2 试验结果

由试验测得的 SFRC 试件在各应力幅值下的疲劳寿命见表 4。

3.3 结果分析

由疲劳试验数据分析可知:SFRC 试件在最大应力水平为 0.6 MPa 时,开始发生疲劳破坏;当最大应力水平为 0.8~0.9 MPa 时,SFRC 试件开始发生稳定破坏;而最大应力水平为 0.6 MPa 以下时,SFRC 试件才出现无限疲劳寿命。

鉴于混凝土材料自身的强离散性,将试验数据作回归处理,利用多项式拟合,得出形如式(1)的一阶指数函数疲劳寿命表达式($S-N$ 曲线)。

$$S_{\max}=\alpha-\beta(1-R)\lg N$$

(1)

表 3 单轴疲劳试验结果

钢纤维体 积率/%	最小应 力/MPa	最大应 力/MPa	疲劳寿命 N /次							
0	0.2	1.3	80	169	398	850	1 198	1 689	2 571	
	0.2	1.2	160	355	801	1 556	2 532	2 960	4 501	5 009
	0.2	1.1	2 383	6 403	7 980	7 607	8 415	13 874	18 749	22 970
	0.2	1.0	4 687	12 521	15 963	16 009	18 520	29 320	40 125	48 652
	0.2	0.9	17 945	18 732	20 106	38 133	42 836	89 271		
	0.2	0.8	36 988	46 239	52 154	84 648	95 625	190 008		
	0.2	0.7	336 090	436 692	722 601	867 121	1×10^6	1×10^6		
	0.2	0.6	658 754	854 120	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6		
0.5	0.2	1.3	108	235	518	1 289	1 801	2 089	3 021	3 252
	0.2	1.2	221	436	926	2 310	3 383	3 854	5 549	6 108
	0.2	1.1	2 845	8 167	9 862	9 176	10 045	16 425	21 664	26 199
	0.2	1.0	5 754	16 321	20 107	20 158	22 920	35 800	47 686	57 065
	0.2	0.9	31 163	30 966	32 335	50 308	54 997	100 788	192 599	
	0.2	0.8	67 643	77 819	84 325	120 069	132 144	235 965	430 187	562 187
	0.2	0.7	312 850	439 134	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6		
	0.2	0.6	724 629	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6		

续表 3

钢纤维体 积率/%	最小应 力/MPa	最大应 力/MPa	疲劳寿命 N /次								
1.0	0.2	1.3	249	421	1 207	2 366	3 723	5 601	6 948	7 029	8 243
	0.2	1.2	321	638	1 597	3 481	5 254	7 869	9 039	9 089	11 702
	0.2	1.1	10 447	21 683	21 863	23 839	32 175	43 396	47 616	49 708	99 422
	0.2	1.0	12 285	25 643	26 811	30 989	42 437	58 077	64 145	66 623	126 940
	0.2	0.9	67 177	79 877	89 965	89 419	134 230	293 460			
	0.2	0.8	111 078	143 114	159 118	162 493	239 841	489 652	1×10^6		
	0.2	0.7	784 210	901 254	983 251	1×10^6	1×10^6	1×10^6			
	0.2	0.6	789 672	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6			
1.5	0.2	1.3	282	498	1 482	2 935	4 634	6 989	8 676	8 778	10 299
	0.2	1.2	450	895	2 215	4 872	7 338	10 808	12 583	14 732	16 076
	0.2	1.1	12 599	26 019	27 235	28 007	39 610	52 975	55 139	56 649	139 306
	0.2	1.0	18 419	36 352	37 878	43 724	60 538	82 653	91 948	96 756	176 695
	0.2	0.9	75 491	90 330	102 117	101 479	153 837	339 885			
	0.2	0.8	157 050	204 059	226 675	246 636	420 488	786 548	1×10^6	1×10^6	
	0.2	0.7	871 463	892 156	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6			
	0.2	0.6	856 179	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6	1×10^6			

注:表中试件数量包含少量因试件不合格而补测的试件个数。

式中: S_{\max} 为最大应力水平, $S_{\max}=\sigma_{\max}/f$,其中 f 为 SFRC 材料的静载抗拉强度,以普通混凝土的抗拉强度值 1.25 倍计; α, β 为材料常数,由试验拟合得到; R 为应力比, $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$; N 为疲劳寿命。

将试验数据作回归分析,用“最小二乘法”对处理后的试验数据作指数函数形式的多项式拟合,得到循环荷载最大应力水平与加载循环次数对数值之间的多项式。

钢纤维体积率等于 0%, $S-N$ 表达式为:
 $S_{\max}=0.1076+0.0528(1-R)\lg N$ (2)

$R^2=0.9669, \sigma=0.0105$

钢纤维体积率等于 0.5%, $S-N$ 表达式:
 $S_{\max}=0.1054+0.0522(1-R)\lg N$ (3)

$R^2=0.9592, \sigma=0.0113$

钢纤维体积率等于 1.0%, $S-N$ 表达式:
 $S_{\max}=0.0981+0.0532(1-R)\lg N$ (4)

$R^2=0.9526, \sigma=0.0124$

钢纤维体积率等于 1.5%, $S-N$ 表达式:
 $S_{\max}=0.0960+0.0563(1-R)\lg N$ (5)

$R^2=0.9462, \sigma=0.0131$

使用 Matlab 对试验数据进行回归拟合,得到不同钢纤维体积率的 $S-N$ 曲线指数函数表达式的相关系数 R^2 为 95%左右,即拟合得到一阶多项式与试验结果符合程度高。各钢纤维体积率试件对应疲劳寿命 $S-N$ 曲线和 $S-\lg N$ 曲线见图 6、7。

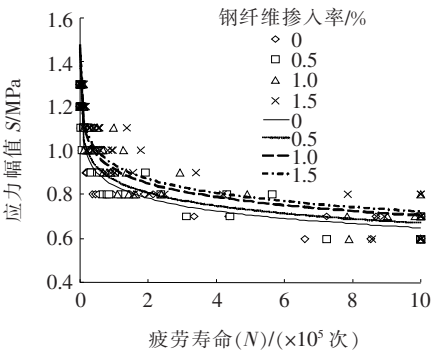


图 6 疲劳寿命 $S-N$ 曲线

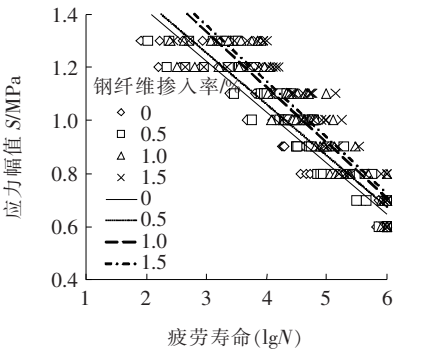


图 7 疲劳寿命 $S-\lg N$ 曲线

由 $S-N$ 曲线可得不同钢纤维体积率的 SFRC 试件疲劳强度及其与普通混凝土试件的增幅关系,见表 4。

表 4 疲劳强度对比

钢纤维掺入率/%	疲劳强度/MPa	增幅/%
0	0.648 6	0.00
0.5	0.690 8	6.51
1.0	0.775 1	19.59
1.5	0.793 1	22.28

由表 4 可以看出:掺入钢纤维后试件的疲劳强度明显增大,但在钢纤维体积率超过 1.0%后,SFRC 材料的疲劳强度增幅减弱。

3.4 疲劳方程

SFRC 材料的疲劳特性与钢纤维体积率、长径比即 $V_f l_f / d_f$ 特征参数密切相关,因此将考虑钢纤维体积率为影响因素的疲劳表达式参照 SFRC 规范推导如下。

SFRC 材料的疲劳抗拉强度标准值:

$$f_{f tk,f} = f_{tk,f} (1 + \alpha_e V_f l_f / d_f) \tag{6}$$

式中: $f_{f tk,f}$ 为 SFRC 材料疲劳抗拉强度标准值; $f_{tk,f}$ 为普通混凝土疲劳抗拉强度标准值; α_e 为影响系数,由试验确定; V_f 为钢纤维体积率; l_f / d_f 为钢纤维长径比。

SFRC 材料的抗拉疲劳应力:

$$S_{cf} = S (1 + \alpha_e V_f l_f / d_f) \tag{7}$$

式中: S_{cf} 为 SFRC 材料抗拉疲劳应力水平; S 为普通混凝土抗拉疲劳应力水平。

根据试验数据拟合确定 $\alpha_e = 0.074\ 1$,并结合式(2)、(6)可得考虑钢纤维体积率的 SFRC 的疲劳方程:

$$S_{cf} = [0.107\ 6 + 0.052\ 8 (1 - R) \lg N] \cdot (1 + 0.074\ 1 V_f l_f / d_f) \tag{8}$$

$R^2 = 0.966\ 9, \sigma = 0.010\ 5$

4 结论

利用电液伺服材料试验机,通过 4 种钢纤维体积率、每种 8 个应力水平的 SFRC 试件单轴疲劳试验研究,得到以下结论:

(1) 钢纤维混凝土在疲劳荷载作用下,钢纤维体积率为 0.5%、1.0%、1.5%时,疲劳强度较普通混凝土分别提高 6.51%、19.59%、22.28%,可以看出掺入钢纤维后试件的疲劳强度明显增大,但在钢纤维体积率超过 1.0%后,SFRC 材料的疲劳强度增幅明显减

弱。因此认为 SFRC 构件疲劳荷载作用下的合理钢纤维体积率可取 1.0%。

(2) 得出考虑钢纤维体积率的 SFRC 材料疲劳方程: $S_{cf} = (0.107\ 6 + 0.052\ 8 (1 - R) \lg N) \cdot (1 + 0.074\ 1 V_f l_f / d_f)$ 。

参考文献:

[1] S. Goel, S. P. Singh. Fatigue Performance of Plain and Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete Using S - N Relationship[J]. Engineering Structures, 2014, 74: 65 - 73.

[2] Germano F, Tiberti G, Plizzari G. Post - Peak Fatigue Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete under Flexure[J]. Materials and Structures, 2016, 49(10): 4 229 - 4 245.

[3] A Parvez, SJ Foster. Fatigue of Steel - Fiber - Reinforced Concrete Pre - Stressed Railway Sleepers[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 241 - 250.

[4] Ruiz G, Medeiros A, Zhang X. Frequency Effect on the Fatigue Life of Plain and Fiber - Reinforced Concrete[J]. 2014, 102(12): 2 365 - 2 372.

[5] Girish M G, Chandrashekar A, Shankar A U R. Flexural Fatigue Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. International Journal of Earth Sciences & Engineering, 2012, 5(5): 1 352 - 1 357.

[6] 杨润年. 钢纤维混凝土静力损伤及疲劳损伤研究[D]. 华南理工大学博士学位论文, 2012.

[7] 高丹盈, 张明, 朱海堂. 钢筋钢纤维高强混凝土梁疲劳试验研究及刚度计算[J]. 建筑结构学报, 2013(8).

[8] 方志, 向宇, 匡镇, 等. 钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011(6).

[9] 侯蔚峰. 钢纤维混凝土弯曲疲劳性试验及抗裂性能研究[J]. 混凝土, 2015(6).

[10] 李书群, 姬宏奎, 杨松. 应力比对钢纤维高强混凝土梁疲劳寿命影响的试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016(4).

[11] 石北啸. 钢纤维混凝土动载疲劳特性的试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008(2).

[12] 冯仲仁, 黄隆洋, 郭蒙蒙, 等. 不同钢纤维掺入率的混凝土疲劳试验研究[J]. 中外公路, 2018(2).

[13] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.

[14] JG/T 472 - 2015 钢纤维混凝土[S].