

循环荷载作用下钢纤维混凝土梁疲劳试验研究

冯仲仁, 吕尔燕, 郭蒙蒙

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:该文进行了10片钢纤维混凝土梁的疲劳试验,在3种疲劳荷载水平作用下,对3种不同钢纤维掺入率的混凝土梁的疲劳寿命以及加载过程中跨中挠度、混凝土应变、钢筋应变和斜裂纹宽度的变化规律进行分析研究。试验结果表明:钢纤维掺入率对混凝土梁的裂纹产生时机有很大的影响,而荷载水平影响着钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命和极限疲劳寿命。

关键词:钢纤维混凝土梁;疲劳性能;挠度;应变;斜截面

钢纤维可以很好地改善混凝土的抗裂和抗疲劳性能,可以在一定程度上抑制钢纤维混凝土梁在循环荷载作用下的裂纹扩展。但是钢筋和钢纤维混凝土的材料性能有很大差别,只能采用简单的模型进行计算,这样的计算得到的结果和实际情况有很大的差别,因此为了建立准确的分析模型,进行大量的试验研究十分必要。国内外学者对钢纤维混凝土做了一些相关的试验设计。Nanni A对掺入两种不同类型钢纤维的混凝土

进行了弯曲疲劳试验,探究其力学性能;Germano F对钢纤维切口梁进行三点弯曲疲劳试验,探究钢纤维对疲劳寿命的影响;S. Goel对100 mm×100 mm×500 mm的钢纤维混凝土梁进行弯曲疲劳试验,得到不同荷载幅值作用时试验梁的S-N曲线,分析了钢纤维对试件疲劳力学行为特征的影响;侯蔚峰对钢纤维含量不同的混凝土梁进行弯曲疲劳试验,研究钢纤维对弯曲性能的影响;杨润年设计了钢纤维混凝土梁

可达1 074.6 kN,最大抖振位移可达309.3 mm。因位移过大不利于施工安全。

参考文献:

- [1] 曹映泓,项海帆,周颖.大跨度桥梁随机风场的模拟[J].土木工程学报,1998(3).
- [2] 希缪-埃米尔,斯坎伦-H-罗伯特.风对结构的作用[M].2版,刘尚培,项海帆,谢黎明,译.上海:同济大学出版社,1992.
- [3] 韩兴,黄博,祝兵,等.基于谱分解法的自锚式悬索桥桥梁风致抖振计算分析[J].铁道标准设计,2017(9).
- [4] 丁幼亮,胡心一,张志强,等.考虑桥塔风效应的多塔斜拉桥抖振响应分析[J].工程力学,2014(10).
- [5] 王军泽,华旭刚,郭建民,等.海口司马坡钢桁架异形桥的抗风设计[J].中外公路,2017(4).
- [6] 蒋永林,张龙奇,郑史雄,等.基于虚拟激励法的多维多点随机风作用下大跨度斜拉桥抖振响应研究[J].中外公路,2017(6).
- [7] 李永乐,安伟胜,蔡宪棠,等.倒梯形板桁主梁CFD简化模型及气动特性研究[J].工程力学,2011(S1).

- [8] 唐浩俊.复杂山区峡谷大跨度钢桁梁悬索桥风致振动及气动措施[D].西南交通大学博士学位论文,2016.
- [9] 曹映泓,项海帆,周颖.大跨度桥梁随机风场的模拟[J].土木工程学报,1998(3).
- [10] 李永乐,周述华,强士中.大跨度斜拉桥三维脉动风场模拟[J].土木工程学报,2003(10).
- [11] 李永乐.风-车-桥系统非线性空间耦合振动研究[D].西南交通大学博士学位论文,2003.
- [12] 李永乐,廖海黎,强士中.桥梁抖振时域和频域分析的一致性研究[J].工程力学,2005(2).
- [13] 李永乐,廖海黎,强士中.大跨度铁路斜拉桥非线性时域抖振分析[J].西南交通大学学报(自然科学版),2004(3).
- [14] JTG/T D60-1-2004 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [15] Scanlan R H. The Action of Flexible Bridges under Wind, II: Buffeting Theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 60(2): 201-211.
- [16] Chen X, Matsumoto M, Kareem A. Aerodynamic Coupling Effects on Flutter and Buffeting of Bridges[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(1): 17-26.

的弯曲疲劳试验,对其损伤规律进行研究;黄隆洋等设计了不同钢纤维掺入率的混凝土梁疲劳试验,探究钢纤维体积率对疲劳寿命的影响。既有研究主要针对钢纤维混凝土的材料特性及钢纤维的影响等方面,鲜有对尺寸较大的结构疲劳特性、力学性能等进行试验研究。该文设计 10 片不同钢纤维掺入率的混凝土梁,在 3 种荷载状况下进行试验,对钢纤维混凝土梁在疲劳荷载作用下的受力变形、破坏形式等进行研究,分析掺入钢纤维对混凝土梁的抗疲劳性能的影响,以期充分发挥钢纤维混凝土的优越性,更好地解决钢纤维混凝土的抗疲劳问题。

1 试验概况

1.1 试验梁设计

试验中对其中 1 片梁进行静载试验,主要是为了判定试验梁配筋是否合适以及测定试验梁的静载屈服承载力 P_y (第 1 根纵向受拉钢筋屈服),以便确定疲劳试验所需的荷载;另外 9 片梁进行疲劳荷载试验。试验梁混凝土为普通 C30 混凝土,分别掺入体积率为 0.5%、1.0%、1.5% 的钢纤维。试验梁的长度 $L=3.4$ m,截面尺寸为 $b\times h=200\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,有效跨度 $L_0=3.0$ m,纵向受拉钢筋为 4 ϕ 22 的 HRB335 钢筋,架立钢筋为 2 ϕ 10 的 HRB335 钢筋,箍筋为 ϕ 6 的 HRB335 钢筋。

1.2 加载工况

对于静载试验梁,以纵向受拉钢筋屈服作为试验梁的屈服荷载 P_y ,试验梁发生破坏时的荷载为极限荷载 P_u ,试验测得 $P_y=150.4\text{ kN}$, $P_u=238.3\text{ kN}$ 。疲

劳试验荷载上限值分别为静载试验确定的屈服荷载 P_y 的 45%、55% 和 65%,下限值取屈服荷载 P_y 的 10%。疲劳试验过程中分别记录第 1 条裂纹宽度达到 0.2 mm 时的循环次数为容许疲劳寿命 $N_{0.2}$,钢纤维混凝土梁屈服时的循环次数为屈服疲劳寿命 N_y ,钢纤维混凝土梁破坏时的循环次数为极限疲劳寿命 N_u 。疲劳加载直至钢纤维混凝土梁发生破坏停止。

2 试验结果

2.1 试验梁破坏形态

钢纤维混凝土梁在循环加载作用下,1 片发生弯曲破坏,与静力加载破坏形式相似;另外 8 片均发生剪切破坏,钢纤维混凝土梁破坏形态如图 1 所示。试验梁破坏前有明显的征兆,试验梁跨中挠度、混凝土和受拉钢筋应变都快速增大,同时梁内发出“咯吱”响声。



图 1 试验梁破坏形态

2.2 试验梁疲劳寿命

试验梁疲劳寿命试验结果如表 1 所示。从初步试验结果可以看出:大多数试验梁表现为斜截面破坏,最终裂纹的分布情况基本相同,在剪跨区有 1 条破坏主裂缝,其裂纹最终分布情况和钢纤维的掺入量、施加的疲劳荷载大小均不相关。

表 1 试验梁疲劳寿命试验结果

试验梁 编号	加载大小	钢纤维掺 入量/%	疲劳寿命/($\times 10^4$ 次)			破坏描述
			$N_{0.2}$	N_y	N_u	
B-11	0.45 P_y	1.5	185.7	269.7	512.7	512.7 万次剪跨段梁底纵向钢筋断裂
B-12	0.45 P_y	1.0	150.4	240.2	508.7	508.7 万次发生正截面弯曲破坏
B-13	0.45 P_y	0.5	119.8	223.5	497.2	497.2 万次剪跨段梁底纵向钢筋断裂
B-21	0.55 P_y	1.5	151.6	196.6	389.5	389.5 万次剪跨段梁底纵向钢筋断裂
B-22	0.55 P_y	1.0	129.0	177.8	342.1	342.1 万次剪跨段梁底纵向钢筋断裂
B-23	0.55 P_y	0.5	91.8	165.0	352.6	352.6 万次剪压区混凝土被压碎,箍筋断裂
B-31	0.65 P_y	1.5	87.2	166.0	290.8	290.8 万次剪跨段梁底纵向钢筋断裂
B-32	0.65 P_y	1.0	67.4	149.5	248.6	248.6 万次剪压区混凝土被压碎
B-33	0.65 P_y	0.5	55.6	131.7	217.7	217.7 万次剪跨段梁底纵向钢筋断裂

从表1中可以看出:①钢纤维的掺入量对容许疲劳寿命 $N_{0.2}$ 有较大的影响。钢纤维掺入量越大,其容许疲劳寿命 $N_{0.2}$ 越大,钢纤维混凝土梁的初始裂纹出现也较晚,其发展速率也相对较慢。钢纤维掺入量对屈服疲劳寿命 N_y 以及极限疲劳寿命 N_u 的影响相对较小。而疲劳荷载大小和幅值对裂纹出现的时机、裂纹出现的初始宽度以及裂纹发展的速率均有很大的影响,屈服疲劳寿命 N_y 和极限疲劳寿命 N_u 均由荷载大小以及荷载幅值决定;②在最大荷载水平为 $0.45P_y$ 时,钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命高于200万次,满足相关规范要求,而当最大荷载水平高于 $0.45P_y$ 时,钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命低于200万次,并随着荷载水平的提高而不断减小。

3 试验结果分析

3.1 跨中荷载—挠度曲线

疲劳荷载作用下,跨中挠度随着加载循环次数的增加不断增加,图2为试验梁B-11、B-33的荷载—挠度曲线。

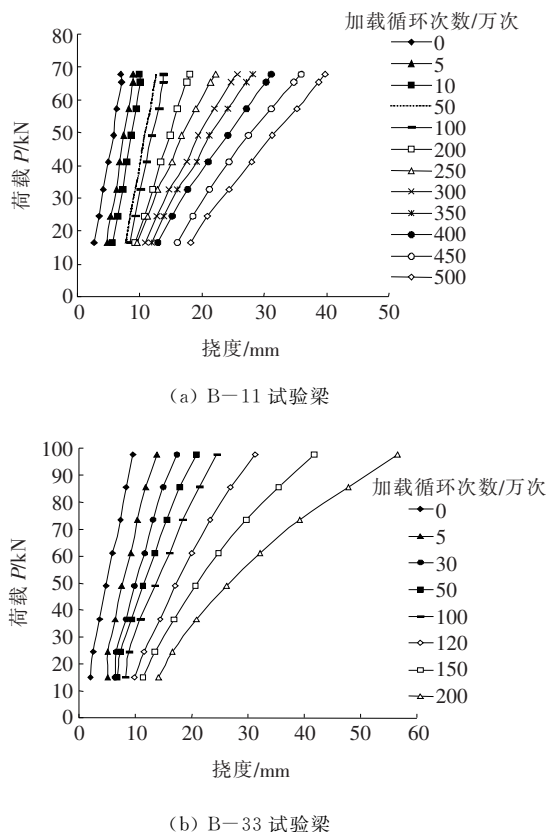


图2 荷载—挠度曲线

从图2可以看出:荷载—挠度曲线随着疲劳寿命

的增加,不断向挠度增大的方向移动,加载初始阶段和后期疲劳破坏阶段,跨中挠度增长相对比较迅速;加载中期,跨中挠度平稳增长,增长速度缓慢,从荷载—挠度曲线的疏密程度可以看出3个阶段的曲线呈“疏—密—疏”的状态。在疲劳加载的前中期,跨中挠度曲线斜率基本没有变化,残余挠度不断增加,曲线不断向右移动;到了疲劳加载后期,随着循环次数的增加,损伤不断累积,钢纤维混凝土梁的刚度不断减小,变形增大,荷载—挠度曲线的斜率不断减小,后期接近疲劳破坏之前,斜率减小更为明显。

3.2 混凝土荷载—应变曲线

试验过程中,采集了跨中截面4个部位的混凝土应变值,以试验梁B-11为例,如图3所示。NO. Z-1、NO. Z-2分别为钢纤维混凝土梁截面上部受压区混凝土荷载应变曲线,随着循环次数的增加,受压区混凝土应变在不断变大,残余应变不断增加,曲线斜率基本保持不变;NO. Z-3为中性轴附近区域混凝土荷载应变曲线,压应变曲线逐渐向拉应变曲线变化,表明钢纤维混凝土梁混凝土受压区高度在不断减小,其钢纤维混凝土梁截面的中性轴也随之不断上升;NO. Z-4为受拉区混凝土荷载应变曲线(350万次后应变片被拉坏),拉应变曲线随着荷载循环次数的增加,不断向应变增大的方向移动,表明残余拉应变在不断增大,拉应变曲线斜率也在不断减小,说明受拉区混凝土损伤在不断积累,弹性模量在逐渐减小。

3.3 钢筋荷载—应变曲线

图4为钢纤维混凝土梁B-11的跨中钢筋荷载—应变曲线。钢纤维混凝土梁在循环加载作用下的跨中钢筋应变变化幅值随循环加载周期增加的变化曲线如图5所示。

从图5可以看出:钢纤维的掺入率只在钢纤维混凝土梁达到允许疲劳寿命之前,对受拉钢筋的应变有一定的影响,而疲劳荷载上限值决定了梁底受拉钢筋应变变化幅值的大小。而钢纤维掺入率的大小决定了允许疲劳寿命的大小,疲劳荷载上限值决定了屈服疲劳寿命和极限疲劳寿命大小。钢纤维混凝土梁的最终破坏形态以及主裂纹的宽度基本相同,梁底受拉钢筋的应变变化幅值也基本一致,荷载上限值越高,破坏时的疲劳寿命越低。

4 斜截面疲劳验算

对9片钢纤维混凝土梁进行试验,其中8片疲劳

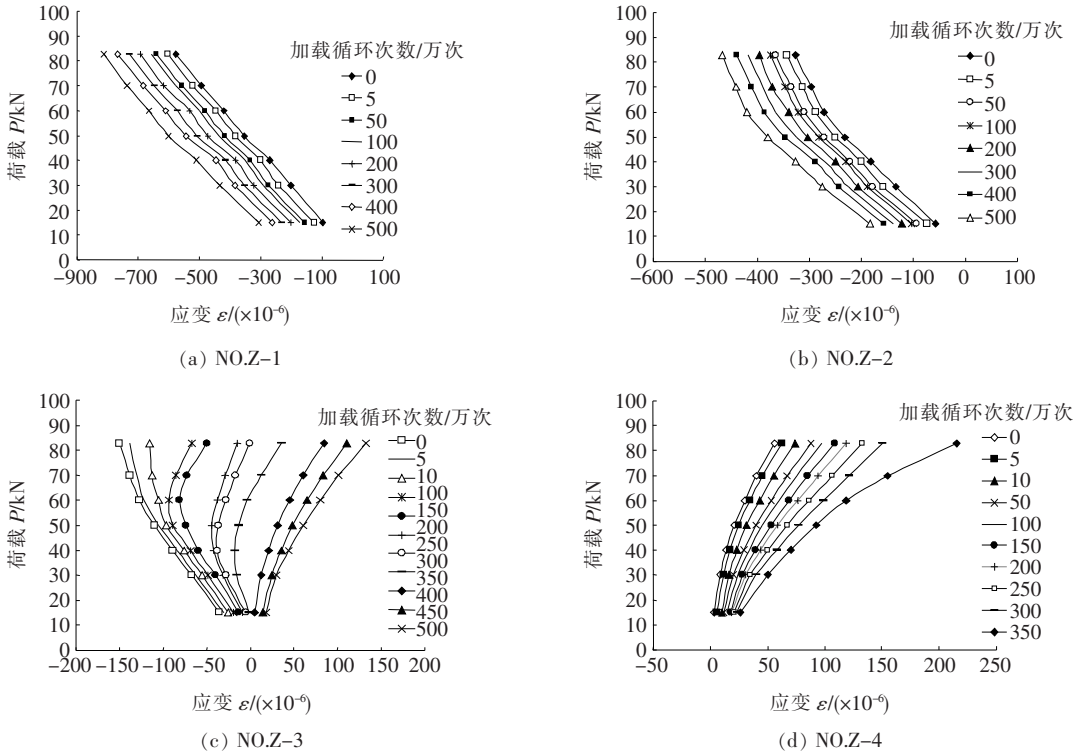


图 3 混凝土荷载—应变曲线

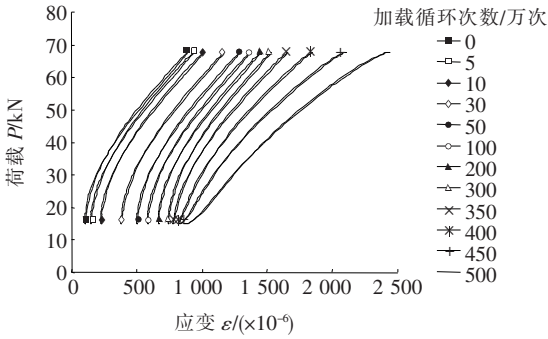


图 4 B-11 梁跨中钢筋荷载—应变曲线

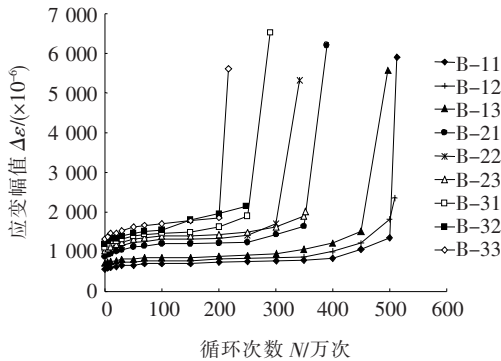


图 5 应变幅值变化曲线

试验梁发生斜截面破坏,而静载试验梁发生正截面弯曲破坏。结果表明构件在静载和循环荷载作用下的破

环形态有差异。在疲劳荷载反复作用下,试验梁的斜裂缝得到充分发展。随着荷载循环次数的增加,斜裂缝处混凝土承担的剪力逐渐降低;箍筋应力、应变急剧增加,发生明显的内力重分配。内力重分配加重了箍筋的负担,且箍筋的疲劳强度低于钢筋本身的疲劳强度,从而使得箍筋首先发生疲劳破坏。在试验后期,疲劳试验梁的斜裂缝发展较快,箍筋在往复荷载作用下首先达到屈服或者断裂,斜截面承载力逐渐下降,进而发生斜截面破坏。表 2 为发生疲劳斜截面破坏试验梁的箍筋应变和斜裂缝宽度实测值。与参考文献[13]、[14]中计算公式求得的结果基本一致,由于试验过程中受应变及裂缝宽度测量误差的影响,个别数值相差较大,但总体试验数据和计算数据是相符的。

5 结论

(1) 钢纤维掺入量对裂纹产生的时机有着直接的影响,而对钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命和极限疲劳寿命没有太大影响;随着钢纤维掺入量的增加,钢纤维混凝土梁的初裂裂纹也随之出现较晚,钢纤维混凝土梁的容许疲劳寿命随之增大。

(2) 疲劳荷载水平越大,钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命和极限疲劳寿命越小,在荷载水平低于

表2 箍筋应变与斜裂缝宽度实测数据

梁编号	不同加载次数(万次)的应变 ϵ_{\max} / 裂纹宽度 w_f									
	2	10	50	100	150	200	250	300	400	500
B-11	577/0.07	700/0.10	803/0.12	894/0.15	981/0.18	1 109/0.21	1 195/0.23	1 416/0.34	1 549/0.38	1 599/0.42
B-13	607/0.09	810/0.13	943/0.14	1 088/0.17	1 120/0.21	1 203/0.23	1 395/0.25	1 496/0.33	1 605/0.41	—
B-21	625/0.08	840/0.14	980/0.16	1 060/0.18	1 200/0.20	1 300/0.26	1 390/0.29	1 475/0.39	—	—
B-22	633/0.08	859/0.13	943/0.15	1 103/0.18	1 271/0.22	1 299/0.28	1 410/0.31	1 505/0.41	—	—
B-23	630/0.07	829/0.13	997/0.17	1 163/0.20	1 301/0.23	1 391/0.26	1 480/0.35	1 555/0.40	—	—
B-31	745/0.09	895/0.15	1 120/0.17	1 210/0.23	1 405/0.26	1 495/0.36	1 598/0.41	—	—	—
B-32	793/0.09	945/0.14	1 197/0.17	1 310/0.24	1 499/0.35	1 601/0.42	—	—	—	—
B-33	786/0.10	989/0.14	1 267/0.19	1 410/0.29	1 516/0.37	1 673/0.43	—	—	—	—

注: ϵ_{\max} 的单位为 $\mu\epsilon$; w_f 为 mm。

0.45 P_y 时,钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命高于 200 万次,满足相关规范的要求;在荷载水平高于 0.45 P_y 时,钢纤维混凝土梁的屈服疲劳寿命低于 200 万次,并随着荷载水平的增大逐渐减小。

(3) 疲劳加载过程中,受压区混凝土残余应变不断增加,弹性模量没有发生明显减小;受拉区混凝土残余应变不断增大,随着加载次数的增加,弹性模量也不断减小;钢纤维混凝土梁跨中挠度在加载前期、中期残余挠度增加,刚度基本保持不变,加载后期,刚度逐渐降低,弹性挠度不断增大。

(4) 试验梁均发生斜截面疲劳破坏,在疲劳荷载反复作用下,试验梁的斜截面承载力逐渐下降,进而发生斜截面破坏,箍筋应变和裂纹宽度实测数据与理论计算数据基本一致。

参考文献:

[1] 何桥敏,周丽.不同钢纤维掺量及黏结剂对混凝土性能的影响[J].中外公路,2018(5).

[2] Nanni A. Design for Torsion Using Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(6): 556—564.

[3] Nanni A. Fatigue Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 1991, 13(4):239—245.

[4] 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.

[5] Singh S P, Ambedkar B R, Mohammadi Y, et al. Flexural Fatigue Strength Prediction of Steel Fibre Reinforced Concrete Beams[J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2008(8):46—54.

[6] Goel S, Singh S P, Singh P. Flexural Fatigue Strength and Failure Probability of Self Compacting Fibre Reinforced Concrete Beams[J]. Engineering Structures, 2012(40):131—140.

[7] 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).

[8] 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,2013.

[9] 杨润年,魏德敏.钢纤维混凝土等幅弯曲疲劳加载下的疲劳应变和疲劳模量以及损伤研究[J].工程力学,2012(11).

[9] 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).

[11] 英娜,张井财,张春巍,等.钢纤维混凝土的弯曲性能试验研究[J].混凝土,2018(8).

[12] 宋玉普.混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M].北京:机械工业出版社,2006.

[13] 赵顺波,赵国藩.预应力钢纤维混凝土梁斜裂缝宽度计算[J].大连理工大学学报,1998(6).

[14] 赵顺波,赵国藩,黄承逵.预应力钢纤维混凝土梁斜截面疲劳性能试验研究[J].土木工程学报,2000(5).