

文章编号:1007-9629(2025)03-0193-09

## HS-SHCC 弯曲疲劳变形与疲劳寿命

周甲佳<sup>1</sup>, 董泽华<sup>1</sup>, 陈本发<sup>1</sup>, 景川<sup>2</sup>, 赵军<sup>3,\*</sup>

(1. 郑州大学力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052; 3. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 对抗压强度为 83.41 MPa 的高强应变硬化水泥基复合材料(HS-SHCC)试件进行了四点弯曲疲劳试验, 研究了 HS-SHCC 试件在不同应力水平(0.70、0.80、0.85、0.90)下的裂缝扩展、跨中挠度及疲劳寿命。结果表明: HS-SHCC 试件的疲劳寿命随着应力水平的提高而不断减小; HS-SHCC 试件在弯曲疲劳荷载下呈现出多裂缝开裂的特征, 随着应力水平的降低, 试件表面的裂缝数量减少; 当应力水平为 0.70~0.85 时, HS-SHCC 试件的跨中挠度呈现出明显的快速发展、稳定发展、失稳三阶段, 而当应力水平为 0.90 时, HS-SHCC 试件的跨中挠度则表现出稳定发展和失稳两阶段特性; 与普通 SHCC 相同, HS-SHCC 试件的应力水平-疲劳寿命( $\lambda-N_f$ )曲线呈现出双线性趋势。基于  $\lambda-N_f$  曲线和三参数 Weibull 分布理论, 提出各失效概率下 HS-SHCC 的弯曲疲劳寿命预测模型, 得出失效概率为 0.05 时 HS-SHCC 的疲劳强度极限(疲劳循环 200 万次)对应的最大应力水平为 0.618。

**关键词:** 高强应变硬化水泥基复合材料; 弯曲疲劳; 疲劳变形; 疲劳寿命预测

中图分类号: TU528.58

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.001

## Flexural Fatigue Deformation and Fatigue Life of HS-SHCC

ZHOU Jiajia<sup>1</sup>, DONG Zehua<sup>1</sup>, CHEN Benfa<sup>1</sup>, JING Chuan<sup>2</sup>, ZHAO Jun<sup>3,\*</sup>

(1. School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Four-point bending fatigue tests were carried out on high strength strain hardening cementitious composite (HS-SHCC) specimens with compressive strength of 83.41 MPa. The crack propagation, mid-span deflection and fatigue life of HS-SHCC specimens at different stress levels (0.70, 0.80, 0.85, 0.90) were studied. The results show that the fatigue life of HS-SHCC specimens decreases with the increase of stress level. The HS-SHCC specimens show multi-cracking characteristic under flexural fatigue loads. As the stress level decreases, the crack numbers on the surface of the specimens show a decreased trend. At the stress level 0.70–0.85, the mid-span deflection of HS-SHCC displays obvious three stages of rapid development, stable development and instability. At the stress level 0.90, the mid-span deflection of HS-SHCC specimens shows two stages of stable development and instability. Similar to ordinary SHCC, the stress level-fatigue life curves ( $\lambda-N_f$  curve) of HS-SHCC specimens show a bilinear trend. Based on the obtained  $\lambda-N_f$  curve and the three-parameter Weibull distribution theory, a flexural fatigue life prediction model of HS-SHCC under different failure probabilities is proposed. On this basis, the maximum stress level corresponding to the fatigue strength limit (corresponding to 2 million fatigue cycles) of HS-SHCC is predicted to be 0.618 when the failure probability is 0.05.

收稿日期: 2024-04-08; 修订日期: 2024-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178257, 51708510); 河南省优秀青年基金资助项目(222300420082)

第一作者: 周甲佳(1984—), 女, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhouaf@zzu.edu.cn

通讯作者: 赵军(1971—), 男, 河南漯河人, 郑州大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhaoj@zzu.edu.cn

**Key words:** high strength strain hardening cementitious composite; flexural fatigue; fatigue deformation; fatigue life prediction

水泥混凝土抗拉强度低、韧性差,严重影响工程结构的耐久性和服役寿命<sup>[1-2]</sup>.应变硬化水泥基复合材料(SHCC)是一种具有应变硬化行为和微细裂缝控制能力的新型材料<sup>[3-5]</sup>,可克服水泥混凝土的上述缺点,用于恶劣环境中.

当SHCC应用于路面工程和桥面工程时,势必会受到疲劳荷载作用.其疲劳性能受到国内外学者广泛关注<sup>[6-18]</sup>.Zhang等<sup>[8]</sup>研究了SHCC铺装层的弯曲疲劳性能,发现SHCC铺装层比混凝土铺装层具有更高的承载能力和变形能力.Huang等<sup>[12-13]</sup>研究了SHCC在不同应力水平下的压缩疲劳变形行为,提出了一种基于三参数Weibull分布的模型来描述其三阶段疲劳变形行为.Liu等<sup>[14-15]</sup>研究了SHCC的弯曲疲劳损伤性能,发现SHCC的起始损伤量和累积损伤量均随着应力水平的降低而降低,并在此基础上建立了相应的损伤模型.

然而,目前的研究主要集中在中低强度SHCC的疲劳性能方面,对高强SHCC(HS-SHCC)的研究尚有不足.与普通SHCC相比,HS-SHCC具有更高的弹性模量、更密实的内部结构和耐磨性能<sup>[19-23]</sup>,更适用于长期承受重复荷载及耐久性要求较高的环境(如近海路面工程和桥面铺装工程).因此,需要对HS-SHCC的疲劳性能进行研究.本文通过四点弯曲疲劳试验,分析了HS-SHCC试件在不同应力水平下的裂缝扩展和跨中挠度变化规律,并利用三参数Weibull分布模型预测了HS-SHCC试件的疲劳寿命.研究成果可为SHCC在实际工程中的应用提供数据参考.

## 1 试验

### 1.1 原材料与配合比设计

原材料为P·O 52.5普通硅酸盐水泥(C)、矿渣粉(GGBS)、聚乙烯(PE)纤维、石英砂(S)、减水剂(SP)和水(W)等.其中,PE纤维长度为12 mm,直径为24  $\mu\text{m}$ ,抗拉强度为3 000 MPa,密度为0.97 g/cm<sup>3</sup>,在HS-SHCC试件中的体积分数为2%.HS-SHCC试件的配合比见表1,其中GGBS为内掺,掺量(文中涉及的掺量、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比)为0.3%.试件标准养护28 d抗折、抗压强度分别为10.63、83.41 MPa,极限拉伸应变为3%.

表1 HS-SHCC试件的配合比

Table 1 Mix proportion (by mass) of HS-SHCC specimens

C+GGBS	S	W	SP
1.000	0.300	0.200	0.136

### 1.2 试件设计与制作

为研究HS-SHCC的高周疲劳特性,本文以应力水平 $\lambda$ (疲劳加载时,疲劳荷载上限与材料静力强度的比值)作为主要参数,设置0.90、0.85、0.80、0.70共4种应力水平,在0.90、0.85、0.80应力水平下制备了5个试件,0.70应力水平下制备了3个试件.采用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的试件进行静力和疲劳弯曲试验.HS-SHCC试件的制备过程见图1.试件浇筑完成后,将其放在实验室中自然养护24 h,随后拆模,放入(20±2)°C、相对湿度95%以上的标准养护室中进行养护.达到相应养护龄期后,将试件从养护室中取出,放置30 d后进行疲劳试验.

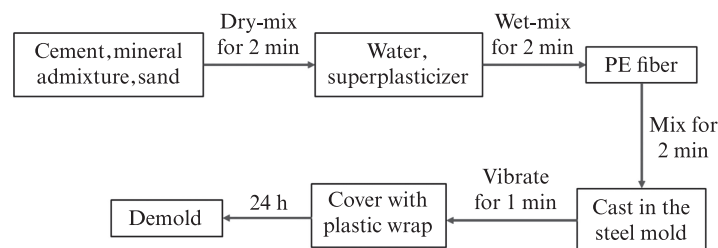


图1 HS-SHCC试件的制备过程

Fig. 1 Preparation process of HS-SHCC specimen

### 1.3 疲劳试验加载方案

静力试验和四点弯曲疲劳试验均采用MTS材料试验系统进行.静力试验采用位移加载模式,加载速率为0.6 mm/min,主要为了获得极限承载力,以作

为疲劳试验疲劳上限的计算依据.疲劳试验则采用荷载控制模式,正弦波加载,加载频率 $f$ 为4 Hz,应力比(疲劳加载时,试件疲劳荷载下限 $P_{\min}$ 和疲劳荷载上限 $P_{\max}$ 的比值)固定为0.1.试验中若出现如下2种

情况,即停止加载,认为试件发生了破坏.第1种情况是,参考静力试验中MTS材料试验系统可以达到的最大竖向位移值,将疲劳试验中MTS材料试验系统的竖向位移限值设置为12 mm,疲劳加载时竖向位移达到此限值;第2种情况是,疲劳循环加载次数达到了200万次(一般认为,疲劳次数达到200万次及以上时,试件进入无限寿命状态,故选用200万次作为本文停止试验的一项标准).疲劳加载示意图如图2所示,疲劳加载曲线如图3所示.

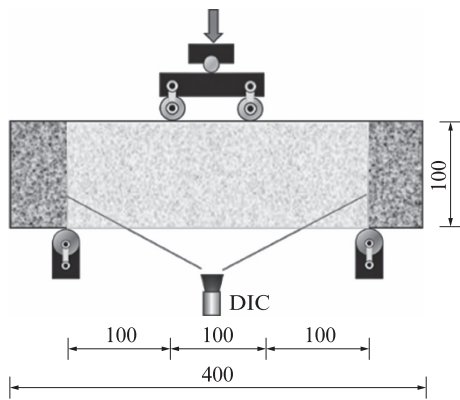


图2 疲劳加载示意图

Fig. 2 Fatigue loading diagram (size: mm)

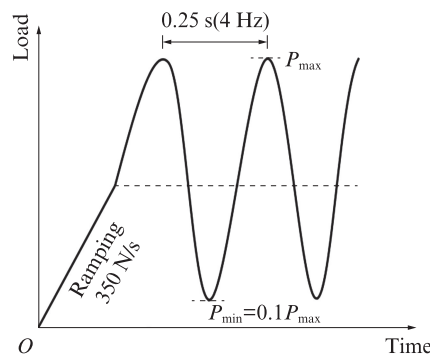


图3 疲劳加载曲线

Fig. 3 Fatigue loading curve

在加载装置的底座上固定1支位移计来实时监测疲劳试验过程中HS-SHCC试件跨中挠度的变化情况.在试件侧面喷射散斑,采用数字图像相关(DIC)非接触测量系统来实时观测试验过程中试件表面裂缝的扩展情况.利用东华数据采集仪对试验中荷载和跨中挠度的实时数据进行采集,采集频率为100 Hz.

## 2 静力荷载下HS-SHCC的荷载-跨中挠度曲线分析

图4为静力荷载下3个HS-SHCC试件的荷载-跨中挠度曲线.由图4可知,HS-SHCC试件的峰值荷载平均值与普通SHCC<sup>[13]</sup>类似,其荷载-跨中挠度曲线也可以分为3个阶段:线弹性阶段(OA段)、应变

硬化阶段(AB段)和破坏阶段(BC段).(1)在线弹性阶段,HS-SHCC试件的荷载-跨中挠度曲线呈现出线性增长的趋势,试件表面没有产生裂缝,HS-SHCC试件底部的拉应力由基体承担,纤维未发挥其桥连作用.(2)在应变硬化阶段,随着荷载的增加,当外荷载超过试件底部基体所能承受的最大拉应变(点A)时,试件表面开始出现裂缝,并在随后的一段时间内产生大量开裂,裂缝数量显著增多.此时,由于纤维的桥连作用,开裂后裂缝宽度没有明显增大,各条裂缝宽度接近,没有明显的主裂缝.(3)在破坏阶段,随着荷载继续增加,试件出现明显主裂缝.达到极限荷载后,试件的荷载-跨中挠度曲线呈现缓慢下降的趋势.破坏时,HS-SHCC试件表现出优异的变形能力,最大跨中挠度可达跨度的1/40.通过力学计算可得,HS-SHCC试件的极限弯曲强度 $f_{bu}$ 为18.32 MPa.

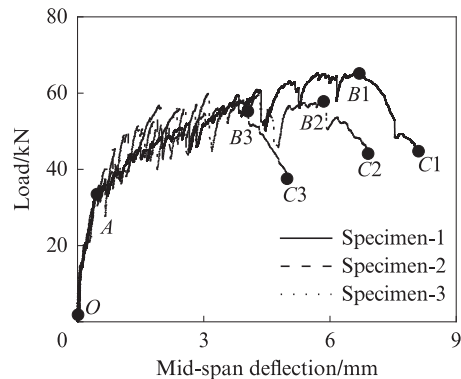


图4 静力荷载下HS-SHCC试件的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Load-mid-span deflection curves of HS-SHCC specimens under static load

## 3 弯曲疲劳试验结果分析

### 3.1 疲劳破坏模式

由于纤维桥连作用,HS-SHCC与普通SHCC类似,在疲劳加载出现裂缝后,仍能够承受一定次数的循环荷载作用而不会立即失效.图5给出了疲劳破坏时,HS-SHCC试件底部纯弯段的裂缝发展情况.由图5可知,HS-SHCC试件呈多裂缝破坏模式.底部纯弯段裂缝数量如表2所示.由表2可见,随着应力水平的降低,HS-SHCC试件底部纯弯段裂缝数量减少.因为应力水平较低时,试件底部纯弯段的应力不能达到新裂缝产生所需要的强度,所以裂缝数量减少.由图5中破坏断面可以看到,大部分纤维被拉断.

为监测HS-SHCC试件在弯曲疲劳加载过程中裂缝的发展情况,本文采用DIC非接触测量系统对疲劳过程中试件侧面的裂缝开展情况进行了实时监

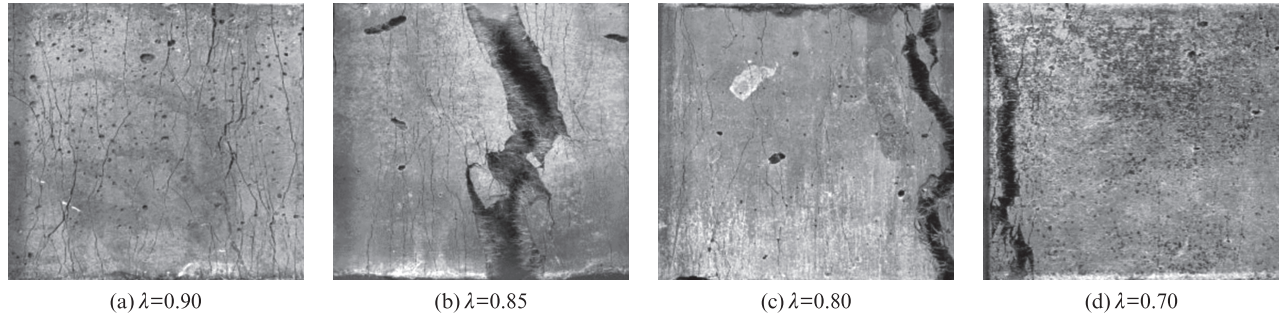


图5 HS-SHCC 试件底部纯弯段的裂缝图  
Fig. 5 Cracks in pure bending section at the bottom of HS-SHCC specimens

表2 不同应力水平下的裂缝数量  
Table 2 Crack numbers under different stress levels

$\lambda$	0.90	0.85	0.80	0.70
Crack number	23	21	17	13

控. 应力水平为0.85时HS-SHCC试件侧面纯弯段的应变场分布见图6. 图中 $N$ 为图片拍摄时已进行的疲劳循环次数, $N_f$ 为疲劳失效循环次数(即疲劳寿命),两者的比值为疲劳系数. 由图6可知,在疲劳加载过程中,HS-SHCC试件表面裂缝的发展可分为3

个阶段:初始阶段、稳定开展阶段和破坏阶段. 在初始阶段,随着疲劳系数的增加,试件侧面的裂缝数量逐渐增多,见图6(a)、(b). 在稳定开展阶段,试件侧面的裂缝数量基本保持不变,但裂缝宽度不断增大,见图6(c)~(e). 在破坏阶段,由于纤维断裂,其桥连作用丧失,主裂缝形成,导致试件最终破坏,见图6(f). 由此可见,由于纤维的桥连作用,HS-SHCC的疲劳破坏具有明显预兆,呈现出延性破坏特征.

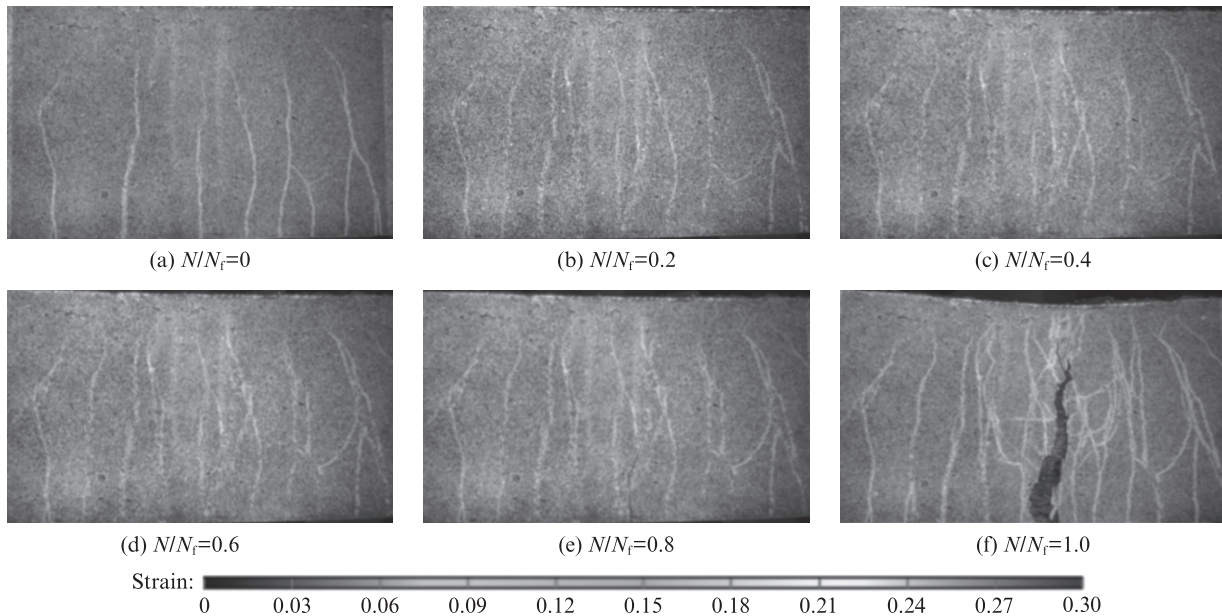


图6 应力水平为0.85时HS-SHCC试件侧面纯弯段的应变场分布  
Fig. 6 Strain field distribution in pure bending section on the side of HS-SHCC specimens at stress level of 0.85

### 3.2 跨中挠度演化曲线

各应力水平下HS-SHCC试件最大跨中挠度与疲劳系数之间的关系如图7所示. 由图7可知,在应力水平为0.70~0.85时,疲劳加载下HS-SHCC试件的最大跨中挠度曲线呈三阶段特征.

(1) 快速发展阶段:随着疲劳次数的增加,HS-SHCC试件表面的裂缝数量增多,试件的跨中最大挠度急速发展. 此阶段大致占总寿命的0%~10%.

(2) 稳定发展阶段:HS-SHCC试件的最大跨中挠度随着疲劳次数的增加,呈线性增长. 试件通过产生新裂缝与裂缝扩展来释放能量,从而维持挠度的稳定发展. 此阶段约占总疲劳寿命的80%~90%. 值得注意的是,在疲劳加载过程中纤维的突然失效,导致试件最大跨中挠度出现了突然增大的现象.

(3) 失稳阶段:当疲劳加载到一定次数后,HS-SHCC试件的最大跨中挠度进入失稳发展阶段.

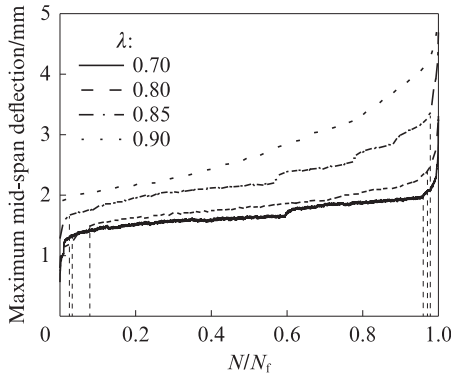


图7 各应力水平下HS-SHCC试件最大跨中挠度与疲劳系数之间的关系

Fig. 7 Relationship between the maximum mid-span deflection and fatigue coefficient of HS-SHCC specimens under different stress levels

在这一阶段中,纤维、界面及基体的损伤导致纤维桥接作用不断弱化,试件跨中挠度快速增大,此阶段约占疲劳寿命的10%左右.

随着疲劳应力水平的增大,HS-SHCC试件的跨中挠度也逐渐增大,在 $\lambda=0.85$ 时试件的跨中挠度可以达到4.5 mm左右,约为 $\lambda=0.70$ 时试件跨中挠度的1.5倍.然而,由于疲劳过程中出现突然破坏,导致不同应力水平下试件的跨中挠度最大值均小于静力试验时的情况.

当应力水平为0.90时,由于在疲劳加载阶段前试件已充分开裂,故跨中挠度曲线没有呈现出快速发展阶段,仅由稳定发展阶段和失稳阶段组成.

### 3.3 疲劳寿命

#### 3.3.1 疲劳寿命

各应力水平下HS-SHCC试件的疲劳寿命如表3所示.由表3可看出,随着应力水平的增大,HS-SHCC试件的疲劳寿命不断减小.这是由于较高的应力水平会加快裂缝扩展速率,从而使HS-SHCC内部出现更多的累积裂缝,最终加速HS-SHCC失效破坏.应力水平为0.80、0.85和0.90时,HS-SHCC试件的平均疲劳寿命相较于应力水平为0.70时分别下降了91.8%、99.0%和99.9%.

#### 3.3.2 $\lambda-N_f$ 曲线

根据疲劳试验结果,本文采用Wöhler方程来描述HS-SHCC的应力水平( $\lambda$ )与循环次数即疲劳寿命 $N_f$ 的关系( $\lambda-N_f$ 方程),如式(1)所示:

$$\lg \lambda = A + B \lg N_f \quad (1)$$

式中: $A$ 、 $B$ 为模型参数,需要通过试验数据拟合来确定其数值.

通过数据拟合可得,HS-SHCC的 $\lambda-N_f$ 方程表达式为:

表3 各应力水平下HS-SHCC试件的疲劳寿命

Table 3 Fatigue life of HS-SHCC specimens at different stress levels

Specimen No.	$\lambda$	Maxium stress/MPa	Stress amplitude/MPa	$N_f$ /times	Mean $N_f$ /times
0.70-1	0.70	12.825	5.77	214 238	
0.70-2	0.70	12.825	5.77	315 866	362 006
0.70-3	0.70	12.825	5.77	555 913	
0.80-1	0.80	14.658	6.60	14 617	
0.80-2	0.80	14.658	6.60	16 201	
0.80-3	0.80	14.658	6.60	26 904	29 676
0.80-4	0.80	14.658	6.60	27 532	
0.80-5	0.80	14.658	6.60	63 128	
0.85-1	0.85	15.573	7.01	1 592	
0.85-2	0.85	15.573	7.01	2 107	
0.85-3	0.85	15.573	7.01	3 153	3 704
0.85-4	0.85	15.573	7.01	5 007	
0.85-5	0.85	15.573	7.01	6 662	
0.90-1	0.90	16.488	7.42	84	
0.90-2	0.90	16.488	7.42	113	
0.90-3	0.90	16.488	7.42	437	410
0.90-4	0.90	16.488	7.42	443	
0.90-5	0.90	16.488	7.42	973	

$$\lg \lambda = \begin{cases} -0.0193 \lg N_f + 0.0019, & 0.85 < \lambda < 0.90 \\ -0.0427 \lg N_f + 0.0863, & 0.70 < \lambda \leq 0.85 \end{cases} \quad (2)$$

HS-SHCC、普通SHCC<sup>[13]</sup>和混凝土<sup>[12]</sup>的 $\lambda-N_f$ 曲线对比如图8所示.由图8可知,HS-SHCC和普通SHCC的 $\lambda-N_f$ 曲线呈双线性关系,而普通混凝土则呈现单线性关系.这主要是由于纤维桥连作用的影响.在材料疲劳领域,多将 $N_f < 10^3$ 定义为低周循环,因此本文将 $N_f < 10^3$ 定义为低周循环阶段, $N_f > 10^4$ 为高周循环阶段, $10^3 \leq N_f \leq 10^4$ 的区间范围定义为转折阶段.从 $\lambda-N_f$ 曲线中可以看出,HS-SHCC与普通SHCC斜率大

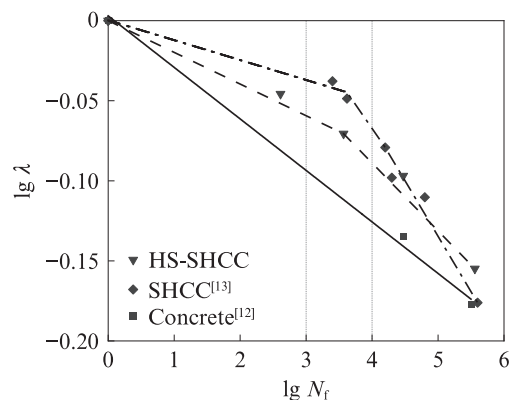


图8 HS-SHCC、普通SHCC和混凝土的 $\lambda-N_f$ 曲线  
Fig. 8  $\lambda-N_f$  curves for HS-SHCC, ordinary SHCC and ordinary concrete

致相同,这说明强度等级对SHCC疲劳寿命影响较小.然而,由于HS-SHCC同参数试件疲劳寿命的离散性,采用上述公式来预测疲劳寿命显得不安全.因此,需要采用较为安全的方法对HS-SHCC的疲劳寿命进行预测.

### 4 HS-SHCC 疲劳寿命预测及疲劳强度

#### 4.1 疲劳寿命的概率分布函数

现有研究<sup>[24-25]</sup>中,通常采用正态分布模型、对数正态分布模型和Weibull分布模型等来描述结构疲劳寿命的概率模型.由于水泥基类材料疲劳寿命的离散性较大,为保证疲劳寿命分析结果偏于安全,一般采用Weibull分布模型来描述混凝土材料的疲劳寿命.本文采用三参数Weibull分布模型进行分析.三参数Weibull分布概率密度函数 $f(N_i)$ 的简化式为:

$$f(N_i) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{N_i - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ - \left( \frac{N_i - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

式中: $\beta, \gamma, \eta$ 分别为形状参数、位置参数和尺度参数.

该模型的累积分布函数见式(4).

$$R(\gamma) = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \ln \ln \frac{1}{1 - F(N_{fi})} \right] [\ln(N_{fi} - \gamma)] - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \ln \ln \frac{1}{1 - F(N_{fi})} \right] \sum_{i=1}^n [\ln(N_{fi} - \gamma)]}{\sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n [\ln(N_{fi} - \gamma)]^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\ln(N_{fi} - \gamma)]^2 \right\} \times \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ \ln \ln \frac{1}{1 - F(N_{fi})} \right]^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \ln \ln \frac{1}{1 - F(N_{fi})} \right]^2 \right\}} \quad (8)$$

$$\frac{d|R(\gamma)|}{d\gamma} = 0 \quad (9)$$

求得 $\gamma$ 后,可通过回归分析求得 $A_1$ 和 $B_1$ 值,进一步得到 $\beta, \eta$ 的值.

按照上述计算过程,获得HS-SHCC试件疲劳寿命的三参数Weibull分布模型的各项参数,如表4所示. HS-SHCC试件在各应力水平下 $X$ - $Y$ 的关系见图9.由图9可知: $\ln[-\ln(1-F(N_{fi}))]$ 与 $\ln(N_{fi}-\gamma)$ 呈线性关系;各应力水平下的相关系数 $R^2$ 均大于0.94,线性相关程度较高,这说明三参数Weibull分布函数可以用来预测HS-SHCC的弯曲疲劳寿命.

#### 4.3 基于失效概率的 $\lambda-N_f$ 疲劳方程

在实际工程应用中,HS-SHCC结构在疲劳设计时应考虑疲劳寿命和疲劳强度的离散性.为了达到安全性要求,须根据可靠度要求建立具有一定可靠度的 $\lambda-N_f$ 方程.本节建立了基于失效概率( $P$ )的 $\lambda-N_f$ 疲劳方程. HS-SHCC的失效概率 $P$ 可采用式(4)进行计算.

$$F(N_i) = P(N < N_i) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{N_i - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

式中: $P$ 为失效概率函数.

由此可得,可靠度函数的表达式为:

$$R(N_i) = 1 - F(N_i) = \exp \left[ - \left( \frac{N_i - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (5)$$

#### 4.2 分布参数的确定

本文采用相关系数优化法来确定分布参数,首先对式(4)进行Weibull变换可得:

$$\ln \left[ - \ln(1 - F(N_i)) \right] = \beta \left[ \ln(N_i - \gamma) - \ln \eta \right] \quad (6)$$

令 $Y = \ln[-\ln(1-F(N_i))]$ ,  $X = \ln(N_i - \gamma)$ ,

$A_1 = \beta, B_1 = -\beta \ln \eta$ ,则式(6)可简化为:

$$Y = A_1 X + B_1 \quad (7)$$

式中 $Y, X$ 呈线性关系,可根据已知的 $n$ 组试验数据 $(N_{fi}, F(N_{fi})) (i=1, 2, \dots, n)$ ,通过上述变换求得相应数据 $(X_i, Y_i)$ (其中 $X_i, Y_i$ 为向式(7)中代入疲劳寿命后得到的值),用以后续计算参数 $A_1$ 和 $B_1$ 的值.为使散点 $(X_i, Y_i)$ 在 $X$ - $Y$ 平面上获得最佳线性,线性相关系数 $|R(\gamma)|$ 取最大值,因此 $\gamma$ 为式(8)的解.

表4 HS-SHCC试件疲劳寿命的三参数Weibull分布模型的参数  
Table 4 Parameters of three-parameter Weibull distribution for fatigue life of HS-SHCC specimens

$\lambda$	$\gamma$	$\beta$	$\eta$
0.90	76.5	0.435 5	87.9
0.85	1 345.7	0.684 2	3 027.5
0.80	13 286.1	0.648 3	18 822.7
0.70	174 288.4	0.694 4	240 313.6

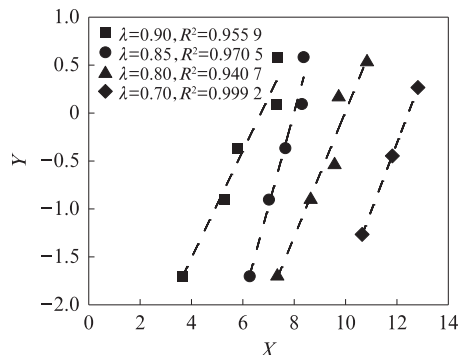


图9 三参数Weibull分布检验拟合结果

Fig.9 Three-parameter Weibull distribution test fitting results

则疲劳寿命  $N_f$  为:

$$N_f = \eta \left[ \ln \left( \frac{1}{1-P} \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} + \gamma \quad (10)$$

基于 Weibull 分布参数可以获得不同失效概率下 HS-SHCC 的等效疲劳寿命,如表 5 所示.将 HS-SHCC 等效疲劳寿命以双对数疲劳方程形式进行线性拟合,可获得不同失效概率下的  $\lambda-N_f$  方程.

表 5 不同失效概率下 HS-SHCC 的等效疲劳寿命  
Table 5 Equivalent fatigue life of HS-SHCC under different failure probabilities

$P$	$\lambda=0.90$	$\lambda=0.85$	$\lambda=0.80$	$\lambda=0.70$
0.05	77	1 385	13 479	177 624
0.10	79	1 459	13 871	183 693
0.20	88	1 684	15 148	202 001
0.50	233	3 118	23 981	316 048
0.95	4 558	16 395	115 541	1 341 062

表 6 不同失效概率下 HS-SHCC 的弯曲疲劳寿命方程  
Table 6 Flexural fatigue life equations of HS-SHCC under different failure probabilities

$P$	Fatigue life equation	$R^2$	$\lambda_{max}$
0.05	$\lg \lambda = -0.0243 \lg N_f \quad (1 < N_f \leq 10^{4.00})$	0.9995	0.618
	$\lg \lambda = -0.0518 \lg N_f + 0.1169 \quad (N_f > 10^{4.00})$	0.9998	
0.10	$\lg \lambda = -0.0225 \lg N_f \quad (1 < N_f \leq 10^{4.01})$	0.9983	0.620
	$\lg \lambda = -0.0517 \lg N_f + 0.1172 \quad (N_f > 10^{4.01})$	0.9995	
0.20	$\lg \lambda = -0.022 \lg N_f \quad (1 < N_f \leq 10^{4.00})$	0.9974	0.622
	$\lg \lambda = -0.0515 \lg N_f + 0.1186 \quad (N_f > 10^{4.00})$	0.9983	
0.50	$\lg \lambda = -0.020 \lg N_f \quad (1 < N_f \leq 10^{4.098})$	0.9989	0.636
	$\lg \lambda = -0.0518 \lg N_f + 0.1299 \quad (N_f > 10^{4.098})$	0.9998	
0.95	$\lg \lambda = -0.0152 \lg N_f \quad (1 < N_f \leq 10^{4.55})$	0.9470	0.686
	$\lg \lambda = -0.0545 \lg N_f + 0.1788 \quad (N_f > 10^{4.55})$	0.9998	

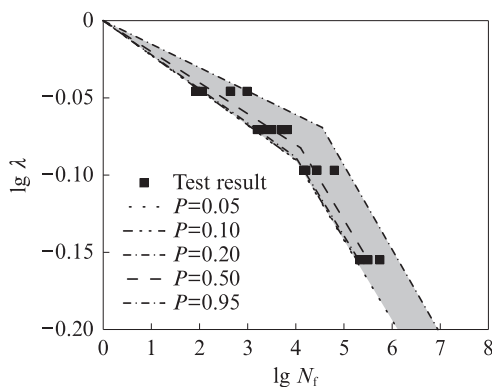


图 10 不同失效概率的  $\lambda-N_f$  模型预测结果

Fig. 10 Prediction results by  $\lambda-N_f$  model with different failure probabilities

## 5 结论

(1)在疲劳荷载作用下,HS-SHCC 试件的破坏模式为多裂缝破坏模式.随着应力水平的降低,底部

采用对数疲劳方程进行线性回归,可得到不同失效概率下的  $\lambda-N_f$  疲劳寿命方程,如表 6 所示.不同失效概率下 HS-SHCC 弯曲疲劳寿命的预测情况如图 10 所示(其中,下边界为失效概率 0.05 的疲劳方程,上边界为失效概率 0.95 的疲劳方程).由图 10 可以看出,本文所有试验数据点均位于上下边界所围成的区域,说明此疲劳预测模型具有较好的可靠度.该模型既可以有效避免过早失效的风险,又能够提供足够的可靠度,保证结构或材料在实际应用中的稳定性和安全性.

根据表 6 中 HS-SHCC 的弯曲疲劳寿命方程,预测失效概率为 0.05 时 HS-SHCC 的疲劳强度极限(200 万次循环加载)所对应的最大应力水平  $\lambda_{max}$  为 0.618.然而,由于试验中选用应力水平的局限性,因此需要进一步的试验研究来验证和修正预测结果.

纯弯段裂缝数量以及试件侧面裂缝数量均不断减小,变形能力减弱.

(2)HS-SHCC 试件的跨中挠度呈现出三阶段的发展趋势,即快速发展阶段、稳定发展阶段和失稳阶段.HS-SHCC 试件跨中挠度的变化取决于疲劳应力水平,随着应力水平的增大,试件破坏时最大跨中挠度减小.

(3)HS-SHCC 试件的  $\lambda-N_f$  曲线呈现出明显的双线性特征,且疲劳应力水平与疲劳寿命之间转折点在  $10^3 \sim 10^4$  之间.

(4)基于三参数的 Weibull 分布建立了 HS-SHCC 在不同应力水平下的疲劳寿命预测方程,并预测出 HS-SHCC 的疲劳强度极限对应的最大应力水平为 0.618.然而,由于试验中选用应力水平的局限性,仍需要进一步的试验研究来验证和修正预测结果.

## 参考文献:

- [ 1 ] 陈肇元, 徐有邻, 钱稼茹. 土建结构工程的安全性与耐久性[J]. 建筑技术, 2002, 33(4):248-253.  
CHEN Zhaoyuan, XU Youlin, QIAN Jiaru. Safety and durability of structural works in civil engineering [J]. Architecture Technology, 2002, 33(4):248-253. (in Chinese)
- [ 2 ] LI V C. 高延性纤维增强水泥基复合材料的研究进展及应用[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(4):531-536.  
LI V C. Process and application of engineered cementitious composites [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2007, 35(4):531-536. (in Chinese)
- [ 3 ] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11):2246-2264.
- [ 4 ] ZHU J X, XU L Y, HUANG B T, et al. Recent developments in engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC) with high and ultra-high strength[J]. Construction and Building Materials, 2022, 342:127956.
- [ 5 ] LI V C. From micromechanics to structural engineering the design of cementitious composites for civil engineering applications[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1993(471):1-12.
- [ 6 ] MUELLER S, RANJBARIAN M, MECHTCHERINE V. Fatigue behavior of strain-hardening cement-based composites—From the single fiber level to real-scale application[J]. Structural Concrete, 2019, 20(4):1231-1242.
- [ 7 ] GUO M H, ZHONG Q L, ZHOU Y W, et al. Influence of flexural loading and chloride exposure on the fatigue behavior of high-performance lightweight engineered cementitious composites [J]. Construction and Building Materials, 2020, 249:24-34.
- [ 8 ] ZHANG J, LI V C. Monotonic and fatigue performance in bending of fiber-reinforced engineered cementitious composite in overlay system[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(3):415-423.
- [ 9 ] SUTHIWARAPIRAK P, MATSUMOTO T, KANDA T. Multiple cracking and fiber bridging characteristics of engineered cementitious composites under fatigue flexure [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(5):433-443.
- [ 10 ] SUTHIWARAPIRAK P, MATSUMOTO T, KANDA T. Flexural fatigue failure characteristics of an engineered cementitious composite and polymer cement mortars[J]. Journal of Materials for Concrete Structures and Pavements, 2002, 57(718):121-134.
- [ 11 ] SUN R J, HAN L B, ZHANG H Z, et al. Fatigue life and cracking characterization of engineered cementitious composites (ECC) under flexural cyclic load[J]. Construction and Building Materials, 2022, 335:127465.
- [ 12 ] HUANG B T, WU J Q, YU J, et al. High-strength seawater sea-sand engineered cementitious composites (SS-ECC) : Mechanical performance and probabilistic modeling[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114:103740.
- [ 13 ] HUANG B T, WU J Q, YU J, et al. Seawater sea-sand engineered/strain-hardening cementitious composites (ECC/SHCC) : Assessment and modeling of crack characteristics [J]. Cement and Concrete Research, 2021, 140:124-138.
- [ 14 ] LIU W, XU S L, FENG P. Fatigue damage propagation models for ductile fracture of ultrahigh toughness cementitious composites [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2017, 26(6):919-932.
- [ 15 ] LIU W, XU S L, LI H D. Flexural fatigue damage model of ultra-high toughness cementitious composites on base of continuum damage mechanics[J]. International Journal of Damage Mechanics, 2014, 23(7):949-963.
- [ 16 ] 韩乐冰. ECC 及其组合板弯曲疲劳性能研究[D]. 济南:山东大学, 2021.  
HAN Lebing. Research on flexural fatigue performance of ECC and its composite slabs[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [ 17 ] 钟倩丽. 正常与氯盐侵蚀环境下超高性能 ECC 与轻质高强 ECC 的疲劳性能试验研究[D]. 深圳:深圳大学, 2019.  
ZHONG Qianli. Experimental study on fatigue property of ultra high performance ECC and high strength lightweight ECC under normal and chloride penetration environment [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2019. (in Chinese)
- [ 18 ] SUI L L, ZHONG Q L, YU K Q, et al. Flexural fatigue properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) reinforced by polymer fibers [J]. Polymers, 2018, 10(8):892.
- [ 19 ] RANADE R, LI V C, HEARD W F, et al. Impact resistance of high strength-high ductility concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2017, 98:24-35.
- [ 20 ] 王秋维, 梁林, 史庆轩. 混杂钢纤维超高性能混凝土轴拉力学性能及本构模型[J]. 复合材料学报, 2024, 41(1):383-394.  
WANG Qiuwei, LIANG Lin, SHI Qingxuan. Mechanical properties and constitutive model of ultra-high performance concrete with hybrid steel fiber under axial tension [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(1):383-394. (in Chinese)
- [ 21 ] YU K Q, YU J T, DAI J G, et al. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158:217-227.
- [ 22 ] 李力剑, 徐礼华, 池寅, 等. 含粗骨料超高性能混凝土单轴受压疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):381-388.  
LI Lijian, XU Lihua, CHI Yin, et al. Fatigue performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate under uniaxial cyclic compression [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):381-388. (in Chinese)
- [ 23 ] 李力剑, 刘素梅, 徐凡丁, 等. 含粗骨料超高性能混凝土的单轴受拉力学性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2):167-173.  
LI Lijian, LIU Sumei, XU Fanding, et al. Uniaxial tensile behavior of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(2):167-173. (in Chinese)
- [ 24 ] 路承功, 魏智强, 乔宏霞, 等. 基于 3 参数 Weibull 分布钢筋混凝土盐腐蚀环境中可靠性寿命分析[J]. 工程科学学报, 2021, 43



(4):512-520.

LU Chenggong, WEI Zhiqiang, QIAO Hongxia, et al. Reliability life analysis of reinforced concrete in a salt corrosion environment based on a three-parameter Weibull distribution[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(4): 512-520. (in

Chinese)

[25] HU W T, QIAN Q. Small data reliability analysis in concrete three-point bending tests: A Weibull mixture model approach based on Weibull fracture theory [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 309: 110344.