

拉弯复合作用下超高性能混凝土抗疲劳性能

方 志^{1,2}, 徐忠心¹, 罗浩秦¹, 唐子龙¹, 刘 琪³, 刘新华³(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 桥梁安全与韧性国家重点实验室(长沙), 长沙 410082;
3. 中国交建第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘 要: 实际工程结构中, 同时承受轴向拉力和弯矩作用的拉弯复合受力构件普遍存在。为明确拉弯复合作用下超高性能混凝土(UHPC)的抗疲劳性能, 通过专门设计的三铰桁架拉压转换加载装置, 对工程中常用的 2% 钢纤维体积掺量 UHPC 在不同偏心率下的疲劳性能进行了试验研究。结果表明: 发生疲劳破坏的 UHPC 试件, 其受拉边缘的应变和裂缝宽度均呈现较快发展、稳定发展和快速发展并破坏的 3 阶段发展规律。随着偏心率的增大, 截面的应变梯度相应增大, 使得试件受拉区相邻层间的应力重分布效应相应加强, 进而导致 UHPC 的疲劳强度相应提高。相较于偏心率为 0 时的轴拉疲劳强度, 偏心率为 0.1、0.4 时的拉弯疲劳强度和 ∞ 时的抗折疲劳强度则分别提高了 11%、46% 和 105%。提出了考虑偏心率 e/h 影响的 UHPC 拉弯疲劳方程, 可用其对不同偏心率和不同应力水平下 2% 钢纤维体积掺量 UHPC 的疲劳寿命进行较好预测。

关键词: 超高性能混凝土; 偏心率; 拉弯复合作用; 疲劳强度; 疲劳方程

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)2-0367-13

网络出版时间: 2024-08-07



超高性能混凝土(UHPC)是基于最大堆积密度原理配制而成的一种新型水泥基复合材料, 具有超高的力学性能和耐久性能, 在土木工程中具有广阔的应用前景^[1-3]。

基于 UHPC 的高强, 可形成较轻薄构件而大幅降低结构自重, 使得在结构总的荷载效应中, 活荷载效应占比会显著提高并产生较大的应力幅而导致结构可能发生疲劳破坏。因此, 疲劳问题有可能成为控制这类轻型 UHPC 结构设计的关键问题^[4]。

实际工程结构中, 同时承受轴向拉力和弯矩作用的拉弯复合受力构件普遍存在。如桥梁负弯矩区主梁的桥面板结构, 主梁截面在负弯矩整体(亦称为结构第一体系受力)作用下, 由于顶板厚度远小于梁整体截面高度, 使得桥面板的纵桥向受力接近轴心受拉状态; 而在车辆局部轮载作用下, 桥面板截面则处于弯曲受力状态(亦称为结构第二体系受力状态)。因此, 在整体和局部荷载的同时作用下, 负弯矩区主梁桥面板结构处于拉弯复合作用状态^[5-6]。

UHPC 材料轴拉和弯拉或抗折强度测试时, 试件截面上的应力分布状态存在显著差别。弯曲受力

时, 由于截面上应变梯度的存在, 使得受力过程中, 特别是在截面开裂后, 截面受拉区相邻层间不断发生的应力重分布, 导致测得的材料抗折强度较高, 约为轴拉强度的 2 倍^[7], 且其抗拉和抗折疲劳强度间亦存在显著差别^[4, 8-11]。由于轴拉和纯弯是拉弯复合受力的 2 个边界, 因此可推断: 拉弯复合作用下 UHPC 的强度应该介于轴拉强度和纯弯强度之间, 并与拉弯应力比有关。因此研究不同拉弯应力比下 UHPC 的抗疲劳性能具有明确的工程背景及相应的理论价值。

迄今国内外学者对 UHPC 的轴拉疲劳性能和弯曲疲劳性能已开展了相应研究。Makita 等^[8]试验研究了等幅循环荷载作用下 UHPC 的轴拉疲劳性能, 结果表明: 弹性极限强度或初裂强度是描述 UHPC 轴拉疲劳强度的重要指标, 在 10^7 次循环荷载作用下, 轴拉疲劳强度约为 0.7 倍轴拉初裂强度; Parant 等^[9]试验研究了 UHPC 在四点弯曲作用下的疲劳性能, 结果表明: 在 2×10^6 次循环荷载作用下, 弯曲疲劳强度约为 0.65 倍弯曲极限强度; 程俊等^[10]试验研究了钢纤维掺量和形态对 UHPC 弯曲疲劳寿命的

收稿日期: 2024-03-05。 修订日期: 2024-03-22。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51938012)。

第一作者: 方 志(1963—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-03-05. Revised date: 2024-03-22.

First author: FANG Zhi (1963—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: fangzhi@hnu.edu.cn

影响, 结果表明: 增大纤维掺量或掺入端钩型纤维可提高 UHPC 的弯曲疲劳寿命, 在 2×10^6 次循环荷载作用下, UHPC 的弯曲疲劳强度约为其弯曲极限强度的 0.65~0.70 倍; Ríos 等^[11]试验研究了常温和高温(100 °C 和 200 °C)下 UHPC 的弯曲疲劳性能, 结果表明: 随着温度的升高, 由于 UHPC 内的孔隙率显著增加, 使得循环荷载下 UHPC 的弯曲疲劳强度明显降低, 在 10^7 次循环荷载作用下, 高温环境下 UHPC 的弯曲疲劳强度约为 0.47 倍弯曲极限强度; 方志等^[4]对 20 °C 和 -10 °C 2 种温度下 UHPC 的弯曲疲劳性能进行了试验研究, 结果表明: 随着温度的降低, 循环荷载作用下 UHPC 的弯曲疲劳性能明显退化, 在 2×10^6 次循环荷载作用下, -10 °C 时的弯曲疲劳强度为 0.56 倍弯曲极限强度。

综上所述, 现有研究主要集中于钢纤维种类和掺量以及温度对 UHPC 弯曲疲劳性能的影响, UHPC 的轴拉疲劳性能也仅有少量研究, 拉弯复合作用下 UHPC 抗疲劳性能的研究则鲜见文献报道。因此, 本工作对拉弯复合作用下 UHPC 的受力性能进行试验研究, 以期明确不同拉弯应力比下 UHPC 的抗疲劳性能, 进而确定相应的疲劳强度。

1 实验

1.1 材料力学性能

所用 UHPC 为商品预混料, 设计强度等级为 150 MPa, 其配合比见表 1。其中, 水泥选用 P·O 52.5 普通硅酸盐水泥, 比表面积 445 m²/kg; 硅灰外观呈灰白色, SiO₂ 含量为 93.9%, 比表面积为 18 500 m²/kg; 石英砂和石英粉粒径分别为 10~20 目(0.9~2.0 mm)和 325 目(平均粒径为 50.1 μm); 减水剂采用聚羧酸高效减水剂, 减水率为 30%; 拌合水选用城市自来水。UHPC 中的钢纤维体积掺量为工程中常用的 2%, 钢纤维为表面镀铜平直纤维, 长 13 mm、直径 0.2 mm, 抗拉强度 ≥ 2500 MPa。

表 1 UHPC 配合比

Table 1 Mixture proportion of UHPC						w/%
Cement	Silica fume	Quartz sand	Quartz powder	Superplasticizer	Water	
1.00	0.32	1.10	0.30	0.05	0.18	

w is mass fraction.

依照相关规程规定^[12], UHPC 立方体抗压强度由边长为 100 mm 的立方体试块测得; 轴心抗压强度和弹性模量由 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱

体测得; 弯拉或抗折强度由 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体测得; 轴拉强度由狗骨头试件测得, 其尺寸及试验装置如图 1 所示。

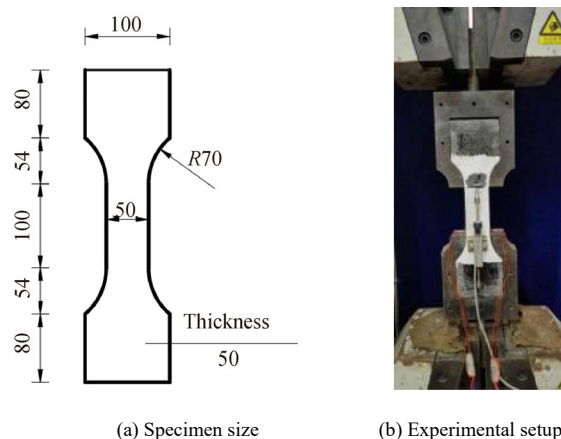


图 1 UHPC 轴心受拉试验(单位: mm)

Fig. 1 UHPC axial tension test(Unit:mm)

材性试块与试件在相同环境下养护。实测 UHPC 的基本力学性能如表 2 所示。

表 2 UHPC 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the UHPC							MPa
Statistic	f_{cu}	f_c	E_c	f_{be}	f_{bp}	f_{te}	f_{tp}
Mean	160.5	136.9	46 580	15.0	28.5	10.2	12.7
Std	2.4	2.8	590	0.1	0.6	0.4	0.7

f_{cu} , f_c and E_c refer to the cubic compressive strength, prismatic compressive strength and compressive elastic modulus of UHPC, respectively, f_{be} and f_{bp} refer to initial cracking strength and ultimate strength of UHPC under bending, respectively, and f_{te} and f_{tp} refer to initial cracking strength and ultimate strength of UHPC under axial tension, respectively. Mean and Std are average value and standard deviation of the test results, respectively.

1.2 试件设计与制作

图 2 为拉弯复合作用下构件截面的受力情形, 可见: 截面轴向受拉和弯曲的复合受力与偏心受拉等效, 轴拉和纯弯是拉弯复合受力的边界情形。

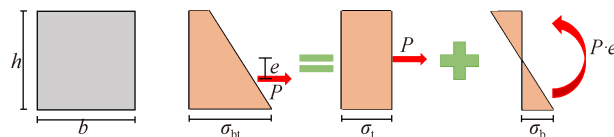


图 2 拉弯复合受下载面的弹性应力分布

Fig. 2 Distribution of elastic stress in cross-section under combined tension and bending action

对于矩形截面, 其弹性阶段的应力有:

$$\sigma_t = \frac{P}{A} = \frac{P}{bh} \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{M}{W} = \frac{Pe}{bh^2/6} \quad (2)$$

$$\sigma_{bt} = \sigma_t + \sigma_b = \frac{P}{bh} \left(1 + \frac{6e}{h} \right) \quad (3)$$

式中: σ_t 、 σ_b 和 σ_{bt} 分别为截面受拉边缘的轴拉、弯拉和拉弯组合应力; P 和 M 分别为作用在截面上的轴拉力和弯矩; b 、 h 、 A 和 W 分别为截面的宽度、高度、面积和弹性抵抗矩; e 为截面上拉力的偏心距。

定义截面受拉边缘的轴拉系数 ξ 为:

$$\xi = \frac{\sigma_t}{\sigma_{bt}} = \frac{1}{1 + 6e/h} \quad (4)$$

对于轴拉情形, 相对偏心距或偏心率 $e/h=0$, $\xi=1$; 对于纯弯情形, 偏心率 $e/h=\infty$, $\xi=0$ 。亦即截面受拉边缘的拉弯应力比可以通过截面的偏心率来表达。因此以偏心率 e/h 为试验参数, 设计制作了 25 个 UHPC 试件, 其中 9 个试件测试其静力性能, 16 个试件测试其疲劳性能。UHPC 的拉弯复合受力性能和纯弯性能由图 3 所示两端带牛腿的偏心受拉试件和等截面四点弯曲小梁分别进行测试。

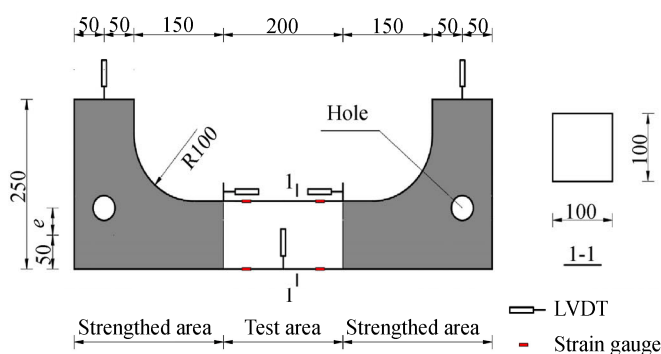
图 3a 所示偏心受拉试件分为测试区和加强区, 其中测试区尺寸为 100 mm×100 mm×200 mm 的棱

柱体, 加强区为带圆弧过渡区的牛腿。为确保破坏截面发生在试件测试区内, 加强区采用碳纤维布包裹。四点弯曲试件采用图 3b 所示 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体。

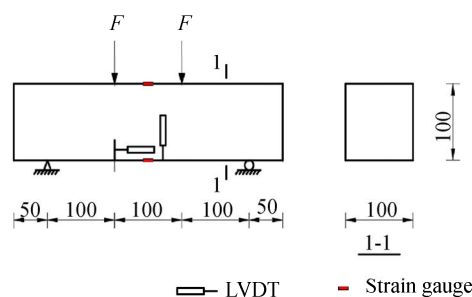
定义疲劳加载的应力水平 $S_e = \sigma_{\max}/f_e$ 或 $S_p = \sigma_{\max}/f_p$, 这里 $\sigma_{\max}$ 为疲劳加载的应力上限, f_e 为静力弹性极限强度或初裂强度, f_p 为静力峰值强度或极限强度; 应力比 $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, 这里 $\sigma_{\min}$ 为疲劳加载的应力下限, 为防止作动器与加载板脱空, 所有疲劳试件均取 $R=0.2$; 应力幅 $\Delta S = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。这里的应力均为按弹性理论计算的截面受拉边缘的名义拉应力。

试件基本参数如表 3 所示。参考文献[8]的结论表示, 弹性极限强度或初裂强度是描述 UHPC 疲劳强度的重要指标。因此, 试验设计时采用相对于弹性极限强度的应力水平 S_e 控制疲劳荷载上限, 共设置了 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2、1.3、1.5 等 7 种应力水平。表中也给出了相对于峰值强度的应力水平 S_p 的值。

试件浇筑完成即覆膜养护 24 h 后拆模, 再进行 48 h 高温蒸汽养护(90±1) °C, 自然冷却后, 再进行试验。



(a) Eccentric tension specimen



(b) Four-point bending specimen

LVDT is linear variable differential transformer.

图 3 UHPC 试件构造 (单位: mm)

Fig. 3 UHPC specimen construction (Unit: mm)

1.3 试验方案

1.3.1 试验装置 拉弯复合作用下 UHPC 静力性能和疲劳性能测试均采用图 4 所示的三铰桁架拉压转换装置进行加载。三铰桁架由斜杆、作为受拉弦杆的试件以及销轴组成, 纵向 2 根对接桁架斜杆的夹角为 120°, 试件达到静力峰值强度时实测该角度值的变化不超过 0.5°。作用在加载板上的竖向力 F , 通过斜杆传递给销轴。销轴传递的竖向分力与支座

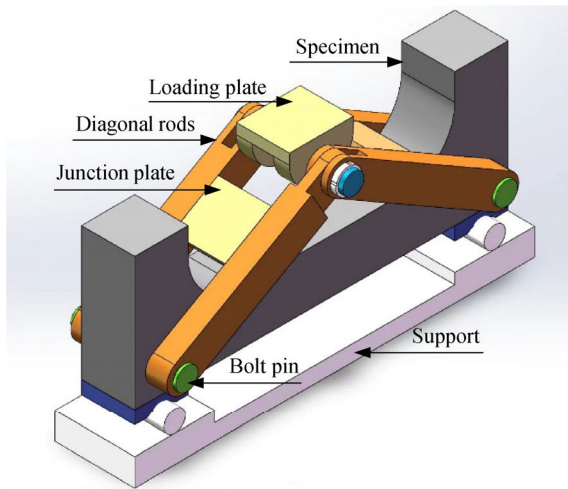
提供的竖向反力相平衡, 而水平分力 T 作用在试件上施加期望的水平拉力。其中, 试件上作用的拉力 T 与竖向力 F 之间的换算关系为 $T = F \cos 30^\circ = 0.866F$ 。

竖向力采用 250 kN 的 PMZ400-4.0 型电液式脉动疲劳试验机施加, 并采用力传感器测定所加荷载的大小; 裂缝宽度采用 ZBL-F101 型裂缝测量仪观测; 荷载、应变和挠度采用 DH3816 应变测试系统采集。

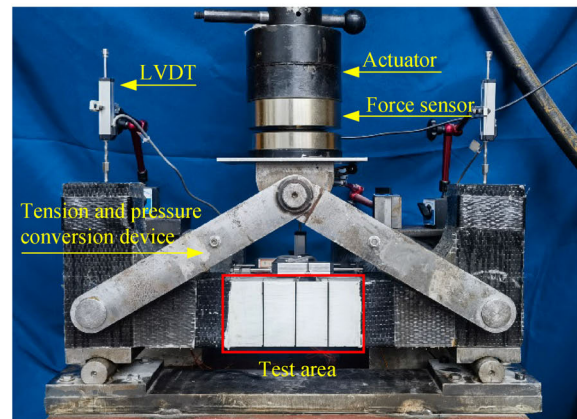
表 3 试验基本参数及试验结果
Table 3 Test parameters and the measured fatigue life

Specimen code	Eccentricity ratio e/h	Static cracking strength		Static ultimate strength		Stress level		Upper limit stress/MPa	Lower limit stress/MPa	Fatigue life
		f_c/MPa		f_p/MPa						
		Mean	Std	Mean	Std	S_c	S_p			
F2-ET0-S0.8	0	9.97	0.13	12.21	0.13	0.8	0.65	7.98	1.60	2 000 000
F2-ET0-S0.9	0					0.9	0.73	8.97	1.79	1 365 980
F2-ET0-S1.0	0					1.0	0.82	9.97	1.99	159 219
F2-ET0-S1.1	0					1.1	0.90	10.97	2.19	11 761
F2-ET0.1-S0.9	0.1	10.92	0.23	13.96	0.24	0.9	0.70	9.83	1.97	2 000 000
F2-ET0.1-S1.0	0.1					1.0	0.78	10.92	2.18	174 626
F2-ET0.1-S1.1	0.1					1.1	0.86	12.01	2.40	23 358
F2-ET0.1-S1.2	0.1					1.2	0.94	13.10	2.62	2483
F2-ET0.4-S0.9	0.4	13.80	0.47	19.12	1.27	0.9	0.65	12.42	2.48	2 000 000
F2-ET0.4-S1.0	0.4					1.0	0.72	13.80	2.76	440 502
F2-ET0.4-S1.1	0.4					1.1	0.79	15.18	3.04	9 1376
F2-ET0.4-S1.2	0.4					1.2	0.87	16.56	3.31	8261
F2-ETB-S1.1	∞	15.01	0.13	28.53	0.64	1.1	0.58	16.51	3.30	2 000 000
F2-ETB-S1.2	∞					1.2	0.63	18.01	3.60	2 000 000
F2-ETB-S1.3	∞					1.3	0.68	19.51	3.90	523 875
F2-ETB-S1.5	∞					1.5	0.79	22.52	4.50	34 191

F2 represents the steel fiber content in volume of 2%, ET and the following number means eccentricity ratio. ETB means pure bending. S and the following number refers to the stress level. Mean and Std are average value and standard deviation of the test results, respectively.



(a) Device connection



(b) Arrangement of loading

图 4 加载布置图
Fig. 4 Loading setup

1.3.2 测点布置 测点布置如图 3 所示，主要测试内容如下：

1) 对于偏心率为 0.1 和 0.4 的拉弯试件及四点弯曲试件，在支座和跨中布置竖向位移计，以获取加载过程中的跨中位移；

2) 在偏心率为 0.4 的拉弯试件测试区底部和四点弯曲试件纯弯段顶部布置电阻式应变片，以测量截面受压边缘的压应变；

3) 在偏心率为 0、0.1 和 0.4 的拉弯试件测试区顶部和四点弯曲试件纯弯段底部布置电阻式应变片，以测量试件受拉区段开裂前的拉应变；同时在试件受拉区纵向连续布置 2 个高精度位移计(标距均为 100 mm)，以测量试件受拉区段开裂后的平均拉应变。

1.3.3 加载方案 疲劳试验采用力控制加载，加载波形为等幅正弦波，加载频率为 4 Hz，加载到试

件上的疲劳应力上、下限见表 3。

若试件在达到 200 万次荷载循环之前发生破坏, 此时的循环次数即为相应应力水平下的疲劳寿命; 若试件在 200 万次荷载循环时未发生疲劳破坏, 则停止疲劳加载, 并静力加载至破坏。所有静力加载均采用位移控制的单调加载, 加载速率为 0.06 mm/min, 直至试件破坏^[12]。

疲劳应力幅以静力试验获得的初裂强度为基准, 设置相应的应力水平来实现。

试件的静力试验结果如表 3 所示, 表中结果为同组 3 个试件的平均值。可见: 随着偏心率的增加, 试件的初裂强度和峰值强度均有所增加。相比于偏心率为 0 的轴拉试件, 偏心率为 0.1、0.4 和 ∞ 试件截面上的应变梯度不断加大, 相应的初裂强度分别增加了 10%、38% 和 51%, 峰值强度分别增加了 14%、57% 和 134%。不同偏心率下初裂强度和峰值强度的变化与相关疲劳试验结果见图 9。

2 结果及讨论

2.1 疲劳破坏

由表 3 可知 16 个试件的疲劳试验结果: 经历 200 万次荷载循环后尚未发生疲劳破坏的 F2-ET0-S0.8、F2-ET0.1-S0.9、F2-ET0.4-S0.9、F2-ETB-S1.1 和 F2-ETB-S1.2 等 5 个试件, 初始静力荷载加到疲劳上限时, 前 3 个试件均未开裂, 后 2 个纯弯试件均已开裂; 而在 200 万次循环之前即发生疲劳破坏的其余 11 个试件, 初始静力荷载加到疲劳上限时, 仅轴拉试件 F2-ET0-S0.9 未出现开裂, 其余 10 个试件均已开裂。

轴拉试件 F2-ET0-S0.8 初始未开裂且经历 200 万次荷载循环后尚未发生疲劳破坏。100 万次荷载循环后, 测试区段内观测到 2 条裂缝, 最大裂缝宽度为 0.02 mm, 但在随后的循环加载中, 裂缝数量和宽度均基本保持稳定, 试件受力处于疲劳损伤稳定发展的第 2 阶段。

偏拉试件 F2-ET0.1-S0.9 和 F2-ET0.4-S0.9 初始均未开裂且经历 200 万次荷载循环后均未发生疲劳破坏。2 个试件分别在 5 万次和 2 万次荷载循环时各观测到 1 条裂缝, 宽度分别为 0.01 mm 和 0.02 mm, 经过 200 万次荷载循环后, 裂缝分别发展到 2 条和 5 条, 最大裂缝宽度分别发展到 0.06 mm 和 0.03 mm。可见: 受拉边缘应力水平相同时, 随偏心率的提高, 截面上的应变梯度增大, 裂缝数量增多, 裂缝宽度的发展趋缓。

纯弯试件 F2-ETB-S1.1 和 F2-ETB-S1.2 均初始开裂但经历 200 万次荷载循环后均未发生疲劳破坏。初始静力荷载达到疲劳上限时, 纯弯段底部分别出现 1 条和 2 条裂缝, 最大裂缝宽度均为 0.02 mm。200 万次荷载循环后, 裂缝分别发展为 6 条和 8 条, 最大裂缝宽度分别发展到 0.04 mm 和 0.10 mm。亦即偏心率相同时, 随着应力水平的提高, 开裂截面受拉区钢纤维的拉应力增大, 裂缝发展越迅速。

轴拉试件 F2-ET0-S0.9 初始未开裂但发生了疲劳破坏。5 万次荷载循环时, 测试区段内观测到 1 条宽度为 0.01 mm 的裂缝; 100 万次循环后, 裂缝发展到 3 条且最大裂缝宽度发展到 0.04 mm, 试件最终在 136.6 万次时发生疲劳破坏。

试件 F2-ET0-S1.1、F2-ET0.1-S1.1、F2-ET0.4-S1.1 和 F2-ETB-S1.3 初始已开裂且发生了疲劳破坏, 破坏形态分别如图 5 所示。

轴拉试件 F2-ET0-S1.1 初始静力荷载达到疲劳上限时, 测试区段内观测到 3 条裂缝, 最大裂缝宽度为 0.03 mm; 1 万次荷载循环后, 裂缝发展到 4 条且最大裂缝宽度发展到 0.34 mm, 试件最终在 11 761 次时发生疲劳破坏。

偏拉试件 F2-ET0.1-S1.1 和 F2-ET0.4-S1.1 初始静力荷载达到疲劳上限时, 测试区段内均观测到 2 条裂缝, 最大裂缝宽度均为 0.02 mm。试件 F2-ET0.1-S1.1 经过 2 万次荷载循环后, 裂缝发展到 3 条且最大裂缝宽度发展到 0.2 mm, 最终在 23 358 次时发生疲劳破坏; 而试件 F2-ET0.4-S1.1 经过 5 万次荷载循环后, 裂缝发展到 4 条且最大裂缝宽度发展到 0.06 mm, 最终在 91 376 次时发生疲劳破坏。

纯弯试件 F2-ETB-S1.3 初始静力荷载达到疲劳上限时, 纯弯段底部出现 3 条裂缝, 最大裂缝宽度为 0.04 mm; 50 万次荷载循环后, 裂缝发展到 8 条且最大裂缝宽度发展到 0.21 mm, 试件最终在 523 875 次时发生疲劳破坏。

从发生疲劳破坏试件的结果可知:

1) 对于轴拉试件, 应力水平不低于 0.9 时均发生疲劳破坏, 即使应力水平为 0.9 的初始未开裂试件也发生了疲劳破坏;

2) 对于偏心率为 0.1 和 0.4 的偏拉试件, 所有初始开裂的试件均发生了疲劳破坏, 而初始未开裂试件均未发生疲劳破坏;

3) 对于偏心率为无穷大的纯弯试件, 当应力水平不超过 1.2, 即使初始已开裂, 也未发生疲劳破坏;

4) 随着偏心率的增大, 疲劳破坏试件的断裂破

坏面由轴拉时的几近平面转变为纯弯试件的曲折面。

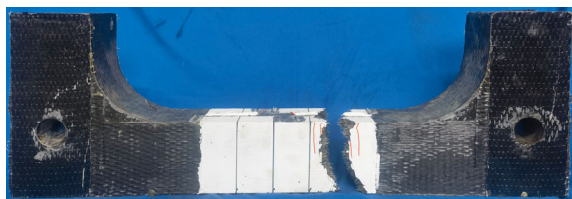
试验结果表明：对于偏心率为 0 的轴拉试件，即使初始未开裂，也可能发生疲劳破坏，而对于偏心率为无穷大的纯弯试件，即使初始开裂，也不一定会发生疲劳破坏。这一现象源于轴心受拉试件全截面均匀受拉，基体中出现受拉开裂敏感缺陷的概率加大，当疲劳应力上限接近初裂强度时，在随后的循环荷载作用下，基体会因损伤累积和缺陷发展而开裂。而轴拉试件截面上不存在应变梯度，开裂后截面上的相邻层间不存在应力重分布，整体截面上的钢纤维几近同时失效，使得轴拉试件的强度较低，基体开裂后均会发生疲劳破坏；而试件纯弯受力时，截面上同时存在拉、压应力区，应变梯度变大，受拉区即使存在初始开裂，由于截面应变梯度导致的受拉区相邻层间的应力重分布效应，使得开裂截面受拉区钢纤维的加强作用只可能逐层逐步失效。循环荷载作用下，只要受拉区钢纤维的抗拉作用足够，仍然不会发生疲劳破坏。



(a) F2-ET0-S1.1



(b) F2-ET0.1-S1.1



(c) F2-ET0.4-S1.1



(d) F2-ETB-S1.3

图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Specimen failure patterns

2.2 疲劳寿命、疲劳方程与疲劳强度

2.2.1 疲劳寿命 疲劳寿命是指疲劳荷载作用下，试件直至破坏时的循环荷载作用次数。若试件在某级循环荷载作用下达到 200 万次且未发生疲劳破坏，停止循环加载，将其疲劳寿命记为 200 万次^[13]。各试件的疲劳寿命汇总如表 3 所示。

由表 3 可知：偏心率为 0、0.1、0.4 和 ∞ 时，试件经过 200 万次荷载循环未发生疲劳破坏的应力水平分别为 0.8、0.9、0.9 和 1.2；在应力水平为 1.1 时，偏心率为 0、0.1、0.4 和 ∞ 的试件，其疲劳寿命分别为 11 761、23 358、91 376 和 2 000 000 次。即应力水平相同时，UHPC 材料的疲劳寿命随偏心率的增大而明显提高，这同样源于前面已讨论的截面上应变或应力梯度不同的影响。随着偏心率的增加，截面上的应变梯度越大，受拉开裂区域相邻层间的应力重分布效应越显著。

2.2.2 疲劳方程 双对数坐标下，不同偏心率试件的疲劳寿命测试结果如图 6 的散点所示，可见与线性关系接近，为此采用最小二乘法进行线性回归分析，得到不同偏心率下的疲劳方程如表 4 所示。

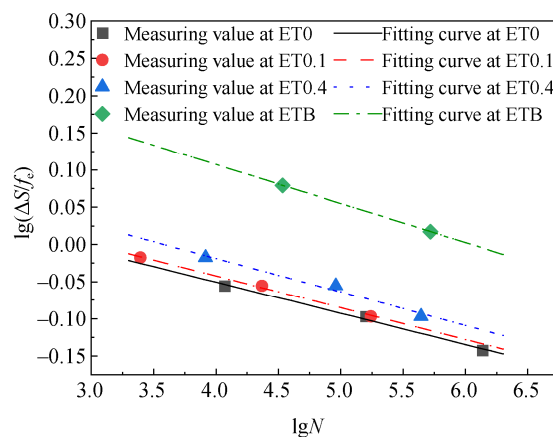


图 6 $\lg(\Delta S/f_c)$ - $\lg N$ 关系曲线

Fig. 6 $\lg(\Delta S/f_c)$ - $\lg N$ curves

表 4 UHPC 疲劳方程

Table 4 Fatigue strength equation of UHPC

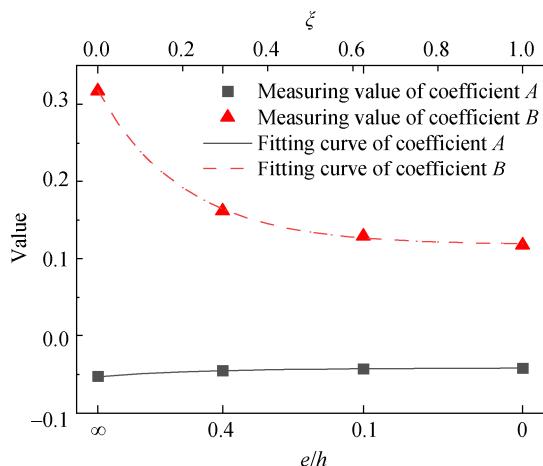
Specimen group	Fatigue equation	Determination coefficient R^2
ET0	$\lg(\Delta S/f_c) = -0.0420 \lg N + 0.1174$	0.997
ET0.1	$\lg(\Delta S/f_c) = -0.0428 \lg N + 0.1288$	0.999
ET0.4	$\lg(\Delta S/f_c) = -0.0451 \lg N + 0.1614$	0.991
ETB	$\lg(\Delta S/f_c) = -0.0524 \lg N + 0.3169$	0.999

N is cycle number.

由表 4 可知，双对数坐标系中不同偏心率试件的疲劳方程均可较好地表达为式(5)：

$$\lg(\Delta S/f_c) = A \lg N + B \quad (5)$$

式(5)中的系数 A 、 B 随偏心率或式(4)所示轴拉系数 ξ 的变化规律如图 7 所示。由图 7 的结果拟合得到式(6)、式(7)所示不同偏心率下疲劳方程的系数 A 和 B ，从而实现不同偏心率下疲劳方程(5)的统一表达。



ξ is axial tension coefficient.

图 7 不同偏心率下疲劳方程的系数 A 、 B

Fig. 7 Coefficients A and B of the fatigue equation with different eccentricity ratios

$$A = -0.042 - 0.011e^{-4\xi} \quad (R^2 = 0.997) \quad (6)$$

$$B = 0.118 + 0.2e^{-5\xi} \quad (R^2 = 0.999) \quad (7)$$

利用式(5)可以对不同偏心率和不同应力水平下 UHPC 的疲劳寿命进行预测。

2.2.3 疲劳强度 基于式(5)所示的疲劳方程，可得到表 5 和图 8 所示不同偏心率下 UHPC 疲劳强度比(疲劳强度 σ_f 分别与静力初裂强度 f_e 或极限强度 f_p 之比)或疲劳强度 σ_f 的变化规律，以及图 9 所示不同偏心率下 UHPC 静力初裂强度和极限强度与相应疲劳强度的比较。

表 5 UHPC 疲劳强度比
Table 5 Fatigue strength ratio of UHPC

Specimen group	$\Delta S/f_e$	σ_f/MPa	σ_f/f_e	σ_f/f_p
ET0	0.71	8.88	0.891	0.727
ET0.1	0.72	9.87	0.904	0.707
ET0.4	0.75	13.00	0.942	0.680
ETB	0.97	18.20	1.212	0.638

σ_f is fatigue strength.

由表 5 和图 8、图 9 可知：随着偏心率的增大，UHPC 的疲劳强度逐渐提高。相较于偏心率为 0 时的轴拉疲劳强度，偏心率为 0.1、0.4 和 ∞ 时的疲劳强度分别提高了 11%、46% 和 105%；相较于偏心率为 0 时的轴拉静力初裂强度和极限强度，偏心率为 0.1、0.4 和 ∞ 时的初裂强度分别提高了

10%、38% 和 51%，而静力极限强度则分别提高了 14%、57% 和 134%。亦即相较于轴拉试件的相应强度，UHPC 疲劳强度的增长幅度介于静力初裂强度和极限强度之间。还可以看到：随着偏心率的增大，UHPC 的疲劳强度比 σ_f/f_e 逐渐增大，而 σ_f/f_p 却逐渐降低。这是因为相同偏心率下，UHPC 的疲劳强度 σ_f 与初裂强度 f_e 相近，但均明显小于极限强度 f_p 。因此，采用相对于弹性极限强度或初裂强度的应力水平指标 $S_e = \sigma_{\max}/f_e$ 能更合理地反映拉弯复合作用下 UHPC 疲劳强度随偏心率的变化特征。

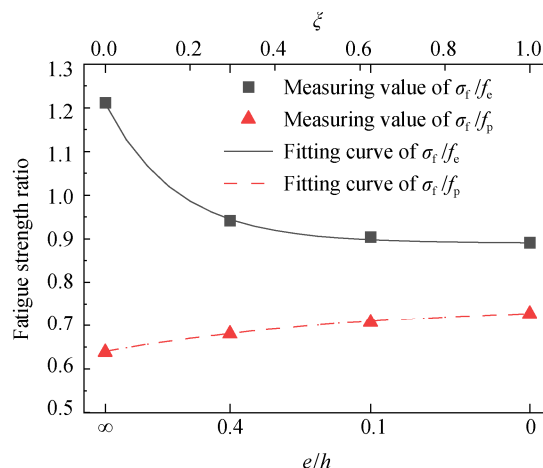


图 8 不同偏心率下 UHPC 疲劳强度比

Fig. 8 Fatigue strength ratio of UHPC with different eccentricity ratios

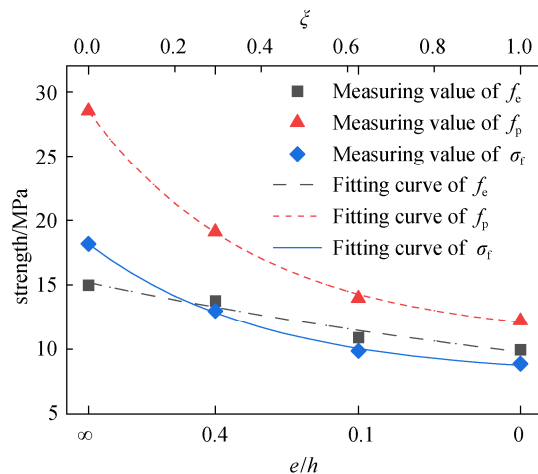


图 9 不同偏心率下 UHPC 强度比较

Fig. 9 Strength comparisons of UHPC with different eccentricity ratios

此外，前述 5 个未发生疲劳破坏试件 F2-ET0-S0.8、F2-ET0.1-S0.9、F2-ET0.4-S0.9、F2-ETB-S1.1 和 F2-ETB-S1.2 的疲劳加载应力上限均低于表 5 中相应的疲劳强度，进一步验证了疲劳

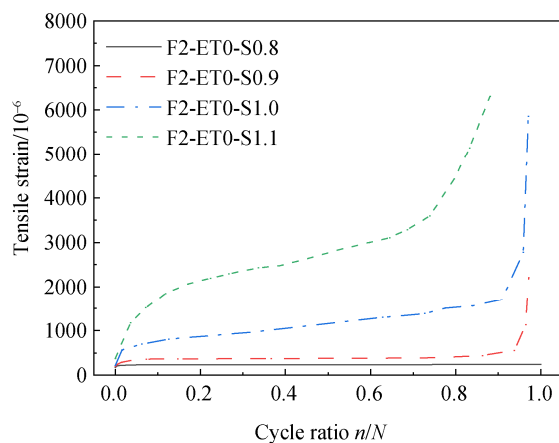
方程(5)的适用性。

2.3 疲劳变形发展规律

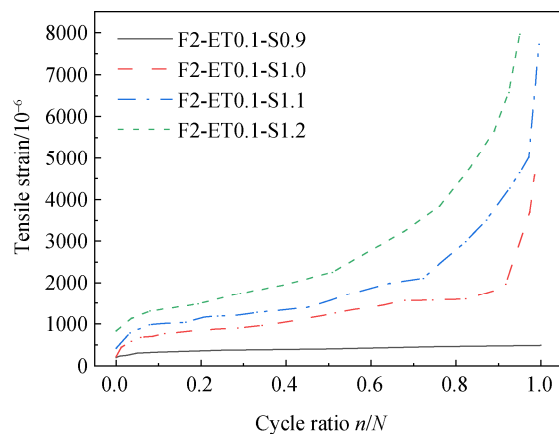
UHPC 的拉弯疲劳破坏是一种内部损伤不断累积、裂纹不断萌生与扩展、裂缝处的钢纤维不断拔出和断裂,试件最终突然断裂的脆性破坏过程。这里试图通过荷载循环作用过程中试件的拉、压应变、跨中位移和裂缝宽度的发展从宏观上刻画拉弯复合作用下试件的损伤演化过程。

2.3.1 拉应变发展规律 图 10 为不同偏心率下试件受拉边缘应变随循环次数比(实时循环次数 n 与疲劳寿命 N 之比) n/N 的发展规律。这里试件受拉边缘的应变,在开裂前为应变片所测得的应变,开裂后为位移计所测得的标距内的平均应变。可见:

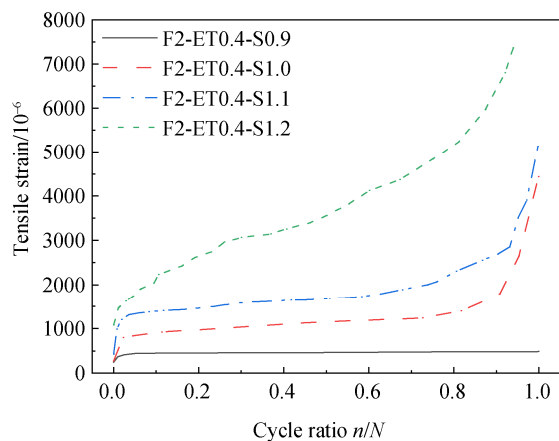
1) 不同偏心率但发生疲劳破坏的试件,其受拉



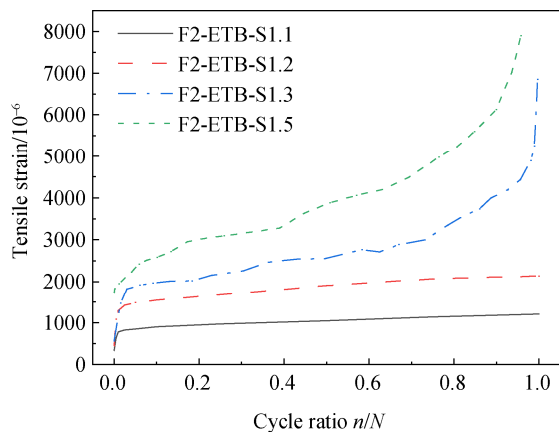
(a) F2-ET0



(b) F2-ET0.1



(c) F2-ET0.4



(d) F2-ETB

图 10 不同偏心率下拉应变-循环次数比曲线

Fig. 10 Tensile strain with different eccentricity ratios-cycle ratio curves

2) 第 2 阶段的应变发展接近线性变化。采用式(8)定义第 2 阶段的应变增长速率 $\dot{\epsilon}_L$ [14]。

$$\dot{\epsilon}_L = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{N_2 - N_1} \quad (8)$$

应变发展均呈现 3 阶段发展规律: 第 1 阶段(较快发展阶段), 曲线陡然上升; 第 2 阶段(稳定发展阶段), 试件均已开裂, 钢纤维发挥作用, 曲线缓慢上升, 相比于第 1 阶段, 应变增加速率明显变缓, 但随着应力水平的提高, 应变增加速率明显增大; 第 3 阶段(快速发展阶段), 钢纤维经过第 2 阶段不断的拉拔作用, 与基体的粘结开始逐渐失效, 裂缝进一步开展, 应变迅速增大并发散, 试件发生脆性断裂。对于经历 200 万次荷载循环仍未发生疲劳破坏的试件, 其受拉应变仅经历较快发展和稳定发展 2 个阶段。由于施加的循环荷载较小, 第 2 阶段应变最终收敛于一稳定值。此外, 相同偏心率时, 随着应力水平的提高, 曲线的第 1 和第 3 阶段占比均有所增加, 第 2 阶段占比则相应减少, 这点与 UHPC 抗压疲劳下应变发展规律相一致 [13]。

式中: ϵ_1 和 ϵ_2 分别为第 2 阶段内测得的最小拉应变和最大拉应变; N_1 和 N_2 分别为 ϵ_1 和 ϵ_2 对应的疲劳循环次数, 统计相近应力水平下发生和未发生疲劳破坏试件的应变增长速率如表 6 所示。

由表 6 可知: 对于发生疲劳破坏的试件, 应力水平相近时, 随着偏心率的增大, 第 2 阶段的应变增长速率逐渐降低。这同样源于前面已讨论过的截面上应变或应力梯度不同的影响。随着偏心率的增加, 截面上的应变梯度越大, 受拉边缘应变的发展越缓慢。对于未发生疲劳破坏的试件, 应力水平相同时, 随着偏心率的增大, 虽然第 2 阶段的应变增长速率亦逐渐降低, 但其值远远小于发生疲劳破坏试件的增长速率且接近于 0, 表明未发生疲劳破坏试件受拉边缘的应变, 在经历第 1 阶段的较快发展后, 在第 2 阶段基本保持不变。

表 6 应变增长速率
Table 6 Strain growth rate

Specimen code	$\varepsilon_1/\mu\varepsilon$	$N_1/10^4$	$\varepsilon_2/\mu\varepsilon$	$N_2/10^4$	$\dot{\varepsilon}_L$
F2-ET0-S1.1	2061	0.2	3284	0.7	2446.0
F2-ET0.1-S1.1	1014	0.3	2108	1.7	781.0
F2-ET0.4-S1.1	1309	0.3	1993	6.7	107.0
F2-ETB-S1.3	1911	3.2	3139	39.5	34.0
F2-ET0.1-S0.9	306	10.0	490	200.0	1.0
F2-ET0.4-S0.9	437	10.0	481	200.0	0.2

ε_1 and ε_2 is the minimum and maximum tensile strains measured during the second stage, respectively. N_1 and N_2 is ε_1 and ε_2 corresponds to the number of fatigue cycles, respectively. $\dot{\varepsilon}_L$ is strain growth rate.

2.3.2 压应变发展规律 由于矩形截面全截面受拉时对应的临界偏心率为 $1/6$, 因此, 仅有偏心率为 0.4 和 ∞ 的试件存在受压区。图 11 为偏心率 0.4 和 ∞ 试件受压边缘压应变随循环次数比增加的发展曲线。可以看到: UHPC 压应变的发展历程与拉应变相似。对于发生疲劳破坏的试件, 其压应变发展呈

现 3 阶段发展规律, 破坏时偏心率 0.4 和 ∞ 试件受压边缘的压应变约分别为 400×10^{-6} 和 1500×10^{-6} ; 而对于未发生疲劳破坏的试件, 其应变发展呈现 2 阶段发展规律。实际上, 拉弯作用下试件的疲劳破坏均由 UHPC 的受拉性能所控制, 压应变发展源于截面裂缝高度不断增加导致截面的不断削弱所致。偏心率为 ∞ 的纯弯试件, 受压区高度和施加的应力上限均较大, 因而疲劳破坏时受压边缘的压应变值较高。

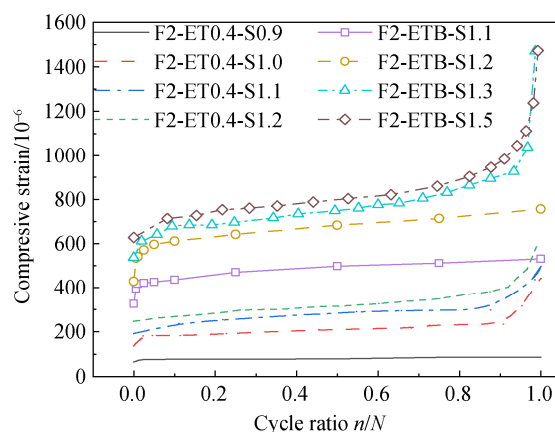
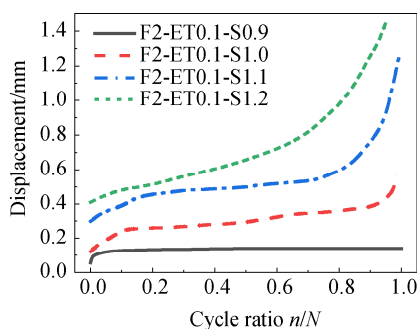


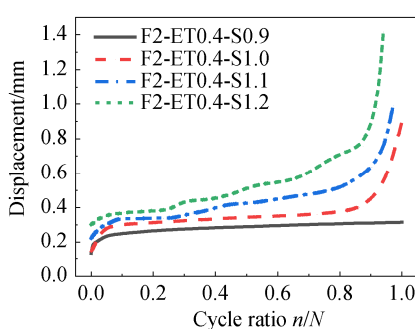
图 11 压应变–循环次数比曲线

Fig. 11 Compressive strain–cycle ratio curves

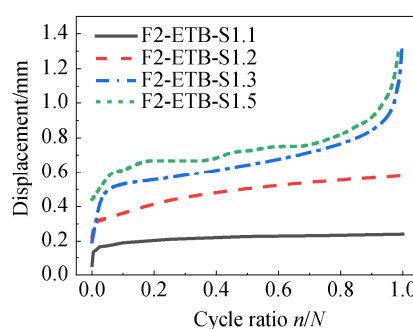
2.3.3 跨中位移发展规律 图 12 为试件跨中位移随循环次数比的发展曲线。由图 12 可见: 疲劳荷载作用下, 开裂后试件的挠度发展主要源于受拉裂缝宽度和高度的增加, 亦主要反映受拉区 UHPC 受拉性能的变化, 故其发展规律与受拉边缘应变的发展规律相似。同一偏心率下, 随着应力水平的提高, 各阶段的跨中位移也相应增大。



(a) F2-ET0.1



(b) F2-ET0.4



(c) F2-ETB

图 12 不同偏心率下跨中位移–循环次数比曲线

Fig. 12 Mid-span displacement at different eccentricities–cycle ratio curves

2.3.4 最大裂缝宽度发展规律 拉弯复合作用下 UHPC 的疲劳破坏均为受拉区裂缝不断扩展直至发散的受拉破坏, 试件最大裂缝宽度的发展过程是 UHPC 受拉疲劳损伤破坏过程的良好表征。图 13 和图 14 为不同偏心率和应力水平下, 发生疲劳破坏试

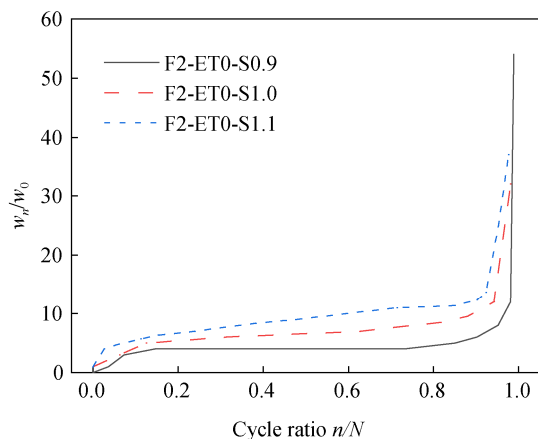
件最大裂缝宽度比(即时宽度 w_n 与初始宽度 w_0 之比)随循环次数比的发展曲线, 并结合表 3 中的疲劳寿命试验结果可知:

1) 最大裂缝宽度发展呈现与受拉应变发展相同的 3 阶段规律, 且相邻阶段分界点所对应的循环

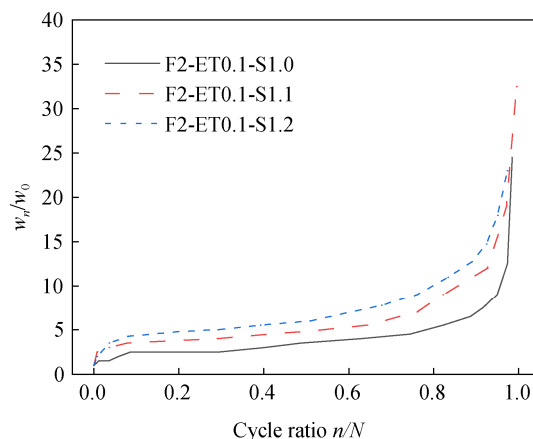
次数比 n/N 相近;

2) 同一偏心率下, 随着应力水平的提高, 由于钢纤维与基体之间界面的损伤加剧、滑移的增大, 导致裂缝宽度发展速率加快, 疲劳寿命急剧降低;

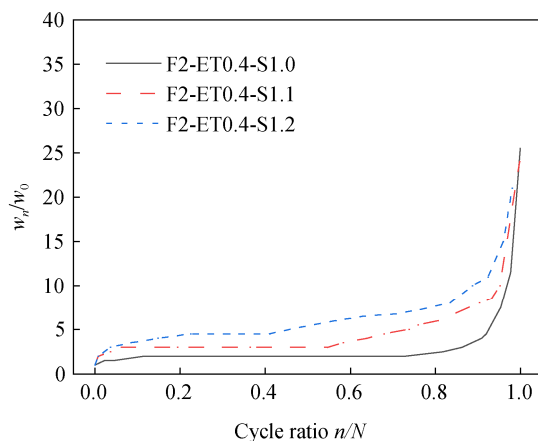
3) 相近应力水平下, 随着偏心率的增大, 由于截面应变梯度加大, 受拉区相邻层间的应力重分布效应愈加显著并约束裂缝的开展, 使得裂缝宽度的发展速率, 特别是裂缝稳定发展阶段的速率明显降低, 试件的疲劳寿命相应提高。



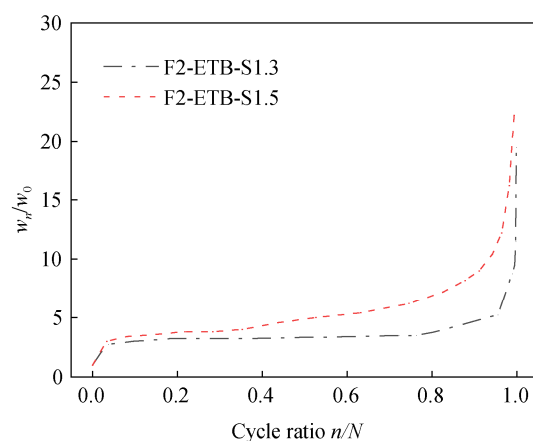
(a) F2-ET0



(b) F2-ET0.1



(c) F2-ET0.4



(d) F2-ETB

w_n is instant width. w_0 is initial width.

图 13 不同偏心率下裂缝宽度比-循环次数比曲线

Fig. 13 Crack width ratio-cycle ratio curves at different eccentricities

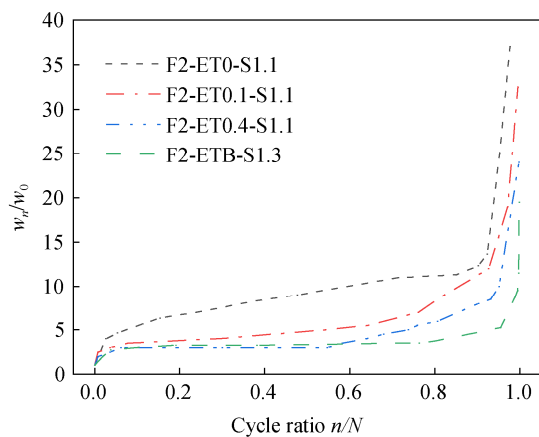


图 14 相近应力水平下裂缝宽度比-循环次数比曲线

Fig. 14 Crack width ratio-cycle ratio curves at similar stress levels

2.4 疲劳后剩余强度

对经历 200 万次循环荷载作用后仍未发生疲劳破坏的 5 个试件进行静载破坏试验, 得到表 7 所示试件疲劳后的剩余强度。可见: 对于应力水平接近其疲劳强度的试件 F2-ET0.1-S0.9 和 F2-ETB-S1.2, 其应力上限分别为相应疲劳强度的 0.996 和 0.990, 试件的累积损伤明显, 疲劳后剩余强度仅分别为其静力强度的 0.79 和 0.73; 而对于应力水平较明显低于其疲劳强度的试件 F2-ET0-S0.8、F2-ET0.4-S0.9 和 F2-ETB-S1.1, 其应力上限分别为相应疲劳强度的 0.90、0.96 和 0.91, 试件的累积损伤轻微, 疲劳后剩余强度分别可达其相应静力强度的 0.96、0.98 和 0.95。

对比试件 F2-ET0.1-S0.9 和 F2-ET0.4-S0.9 的剩余强度可知: 应力水平相同时, 随着偏心率的增大, 疲劳后剩余强度衰减越少; 对比试件 F2-ETB-S1.1 和 F2-ETB-S1.2 可知, 偏心率相同时, 应力水平越高, 累积损伤加大, 疲劳后剩余强度衰减越多。

表 7 疲劳后剩余强度

Table 7 Residual strength after fatigue

Specimen code	Residual strength after fatigue/MPa	Static strength/MPa	Fatigue/static
F2-ET0-S0.8	11.67	12.21	0.96
F2-ET0.1-S0.9	11.08	13.96	0.79
F2-ET0.4-S0.9	18.71	19.12	0.98
F2-ETB-S1.1	27.04	28.53	0.95
F2-ETB-S1.2	20.70	28.53	0.73

3 结论

通过专门设计的三铰桁架拉压转换加载装置, 成功对不同偏心率下 2% 钢纤维体积掺量 UHPC 的拉弯静力和疲劳性能进行了试验研究, 基于试验结果, 可以得到如下结论:

1) 随着偏心率的增大, 截面的应变梯度相应增大, 试件受拉区相邻层间的应力重分布效应相应加强, 使得 UHPC 的静力强度和疲劳强度均相应提高。相较于偏心率为 0 时的轴拉初裂强度、极限强度和疲劳强度, 偏心率为 0.1、0.4 和 ∞ 时的初裂强度分别提高了 10%、38% 和 51%; 极限强度分别提高了 14%、57% 和 134%; 疲劳强度则分别提高了 11%、46% 和 105%, 亦即疲劳强度的变化幅度介于初裂强度和极限强度之间。

2) 随着偏心率的变化, UHPC 疲劳强度的变化趋势与相对于初裂强度的疲劳强度比 σ_f/f_e 相近, 均随偏心率的增大而增大, 且与相对于极限强度的疲劳应力比 σ_f/f_p 的变化趋势相反。因此, 采用相对于初裂强度的应力水平指标 $S_e = \sigma_{\max}/f_e$ 能更合理地反映拉弯复合作用下 UHPC 疲劳强度随偏心率的变化特征。

3) 发生疲劳破坏的 UHPC 试件, 其受拉边缘应变和裂缝宽度均呈现较快发展、稳定发展和快速发展的 3 阶段发展规律, 疲劳断裂破坏面由轴拉时的几近平面转变为纯弯试件的曲折面; 未发生疲劳破坏试件, 其受拉边缘应变在经历第 1 阶段的较快发展后收敛于一稳定值并在随后的第 2 阶段基本保持不变。

4) 经历 200 万次循环而未发生疲劳破坏的试件, 当其应力水平接近其疲劳强度时, 试件的累积

损伤明显, 疲劳后剩余强度明显低于相应的静力强度; 而当应力水平较明显低于其疲劳强度的试件, 试件的累积损伤轻微, 疲劳后剩余强度仅略低于其相应静力强度。

5) 提出了考虑偏心率 e/h 影响的 UHPC 拉弯疲劳方程, 并基于 5 个未发生疲劳破坏试件的试验结果独立验证了其适用性, 可用其对不同偏心率和不同应力水平下 2% 钢纤维体积掺量 UHPC 的疲劳寿命进行较好预测。

需要说明的是, 由于 UHPC 材料疲劳性能, 特别是受拉疲劳性能试验的不易, 本工作仅研究了工程中常用的 2% 钢纤维体积掺量 UHPC 的拉弯疲劳性能, 得到了拉弯应力比或偏心率对这类 UHPC 拉弯疲劳性能的确切影响, 钢纤维掺量对 UHPC 拉弯疲劳性能的影响无疑值得进一步研究。

参考文献:

- [1] DE LARRARD F, SEDRAN T. Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model[J]. Cem Concr Res, 1994, 24(6): 997-1009.
- [2] RICHARD P, CHEYREZY M. Composition of reactive powder concretes[J]. Cem Concr Res, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [3] 邵旭东, 樊伟, 黄政宇. 超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(1): 1-13.
SHAO Xudong, FAN Wei, HUANG Zhengyu. China Civ Eng J, 2021, 54(1): 1-13.
- [4] 方志, 朱启木, 刘绍琨, 等. -10°C 下超高性能混凝土的弯曲疲劳性能[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 473-481.
FANG Zhi, ZHU Qimu, LIU Shaokun, et al. J Chin Ceram Soc, 2022, 50(2): 473-481.
- [5] 方志, 彭忠礼, 谭星宇, 等. 配置 PBL 剪力键钢-UHPC 组合桥面板的纵桥向受拉性能[J]. 公路交通科技, 2023, 40(11): 96-106.
FANG Zhi, PENG Zhongli, TAN Xingyu, et al. J Highw Transp Res Dev, 2023, 40(11): 96-106.
- [6] 邵旭东, 张哲, 刘梦麟, 等. 正交异性钢-RPC 组合桥面板弯拉强度的实验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(10): 7-13.
SHAO Xudong, ZHANG Zhe, LIU Menglin, et al. J Hunan Univ Nat Sci, 2012, 39(10): 7-13.
- [7] BARZIN M, CHOTE S. Closed-form moment-curvature expressions for homogenized fiber-reinforced concrete[J]. Am Concr Inst Mater J, 2007, 104(4): 351-359.
- [8] MAKITA T, BRÜHWILER E. Tensile fatigue behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)[J]. Mater Struct, 2014, 47(3): 475-491.
- [9] PARANT E, ROSSI P, BOULAY C. Fatigue behavior of a multi-scale cement composite[J]. Cem Concr Res, 2007, 37(2): 264-269.
- [10] 程俊. 含粗骨料超高性能混凝土弯曲疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
CHENG Jun. Study on flexural fatigue performance of ultra high performance concrete with coarse aggregate[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

- [11] RÍOS J D, CIFUENTES H, BLASÓN S, et al. Flexural fatigue behaviour of a heated ultra-high-performance fibre-reinforced concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2021, 276: 122209.
- [12] 中国建筑材料联合会, 中国混凝土与水泥制品协会. T/CCPA7-2018 超高性能混凝土基本性能与试验方法[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2018.
- [13] 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, 38(6): 6–12.
- FANG Zhi, XIANG Yu, KUANG Zhen, et al. J Hunan Univ Nat Sci, 2011, 38(6): 6–12.
- [14] 洪锦祥, 缪昌文, 石杏喜, 等. 混凝土疲劳变形曲线三阶段的比例关系与应变速率[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(1): 150–155.
- HONG Jinxiang, MIAO Changwen, SHI Xingxi, et al. J Nanjing Univ Sci Technol, 2013, 37(1): 150–155.

Fatigue Resistance of Ultra-High-Performance Concrete Under Combined Tensile and Bending Action

FANG Zhi^{1,2}, XU Zhongxin¹, LUO Haoqin¹, TANG Zilong¹, LIU Qi³, LIU Xinhua³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience (Changsha), Changsha 410082, China; 3. China Communications Construction Company Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Extended Abstract

Introduction Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), with ultra-high compressive strength and remarkable durability, holds great promise for constructing lightweight and high-performance structures. The ratio of live load effect to total load effect in the lightweight UHPC structure will be significantly increased, and higher cyclic stress amplitudes resulting in fatigue failure of the structure would occur accordingly. The combined tensile and bending stresses exist in certain components of practical engineering structures, such as UHPC bridge decks in the hogging moment region of the girder. Under overall load, the decks are subjected to a state akin to axial tension due to their limited thickness and considerable distance from the neutral axis of the girder. Yet, under the alternating localized wheel loads, the decks are subjected to cyclic bending stresses. Under the simultaneous application of the overall and local loads, UHPC bridge decks in the hogging moment region of the girder are actually subjected to combined tensile and bending stresses with variable amplitude. Many researchers have investigated the effects of steel fiber types, steel fiber content, and temperature on the bending fatigue properties of UHPC. However, there are limited studies on the axial tensile fatigue properties of UHPC, and investigations on the fatigue properties of UHPC under combined tensile and bending action are not found in the available literature. To determine the fatigue-resistant performance of UHPC with different tensile-bending stress ratios or the eccentricity ratio e/h of applied eccentric tension, an experimental study on the fatigue resistance performance of UHPC under combined tensile and bending action was conducted, and the corresponding fatigue strength was determined.

Methods With the test parameter of eccentricity ratio e/h (0, 0.1, 0.4, and ∞ , $e/h=0$ refers to axial tension and $e/h=\infty$ to pure bending), 25 specimens with a commonly used steel fiber content of 2% were designed, manufactured, and tested. Among these, 9 specimens were tested for monotonic properties, and 16 specimens were tested for fatigue properties. The axially tensile and eccentrically tensile properties of UHPC were tested by C-shape specimens with corbel at both ends, and pure bending behaviors of UHPC were tested by four-point bending beams with identical cross-sections. The fatigue test was carried out under different eccentricity ratios and stress levels using a specially designed three-hinge truss device converting the tension loads to compression loads. Electrical resistance strain gauges were arranged at the extreme tensile edge of the specimens to measure the tensile strain before cracking. Two linear variable differential transformers (LVDTs) were continuously arranged in the extreme tensile edge of the specimen with a gauge length of 100 mm to measure the average tensile strain after cracking. The progression of crack width on the surface of specimen during fatigue testing was tracked using a hand-held crack detector with an accuracy of 0.01mm. The number of load cycles until fatigue failure under different stress levels was recorded, and further, the effects of eccentricity ratios and stress levels on fatigue life of UHPC were analyzed.

Results and discussion It was found that the development of fatigue tensile strain and crack width on the tensile surface of the specimens with fatigue failure reveals three stages of increasing rapidly with a decrease of strain rate, a steady growth trend with an almost constant rate, and increasing suddenly following a fatigue fracture. The tensile strain of the specimen without fatigue failure converges to a stable value after the rapid development in the first stage and remains unchanged in the second stage. The fatigue strength of UHPC increases with the eccentricity ratio rising, which can be attributed to the effect of stress redistribution between adjacent stripes in the tensile region caused by the increasing strain gradient on the cross-section. Compared with the corresponding strength of axial tensile specimens, for specimens with eccentricity ratios of 0.1, 0.4 and ∞ , the initial cracking strength is increased by 10%, 38%, and 51%; the ultimate strength is increased by 14%, 57%, and 134%; while the fatigue strength is increased by 11%,

46%, and 105%, which demonstrate that the increased magnitude of fatigue strength lies between that of initial crack strength and ultimate strength. When the stress level of the specimen is close to its fatigue strength, the cumulative damage of the specimen is obvious, and the residual strength after fatigue is significantly lower than the corresponding static strength. When the stress level of the specimen is significantly lower than its fatigue strength, the cumulative damage of the specimen is slight, and the residual strength after fatigue is only slightly lower than its corresponding static strength.

Conclusions As eccentricity ratios rises, the fatigue strength σ_f and the fatigue strength ratio σ_f/f_e increase, while the fatigue strength ratio σ_f/f_p decreases, which means the stress level index $S_e=\sigma_{\max}/f_e$ relative to the initial crack strength can more reasonably reflect the variation of fatigue strength of UHPC with eccentricity ratios under combined tension and bending action. For the UHPC with steel fiber content of 2% under combined tension and bending action, a fatigue equation for predicting the fatigue life of UHPC under different eccentricity ratios and various stress levels is proposed.

Keywords ultra-high-performance concrete; eccentricity ratio; combined tensile and bending action; fatigue strength; fatigue equation