

-10 °C 下超高性能混凝土的弯曲疲劳性能

方 志^{1,2}, 朱启木¹, 刘绍琨¹, 谭星宇¹

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学风工程与桥梁工程湖南省重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 为了解负温时超高性能混凝土(UHPC)的弯曲疲劳性能, 对 20 °C 和 -10 °C 两种温度下的 UHPC 进行了不同应力水平下的弯曲疲劳试验。结果表明: 随着温度的降低, 由于试件开裂截面钢纤维的冷脆特征, 使得循环荷载作用下 UHPC 弯曲疲劳性能的退化明显加剧, 疲劳强度也明显降低。与 20 °C 的结果相比发现, -10 °C UHPC 的疲劳强度降低了 15.6%; 虽然低温试件的疲劳强度低于常温试件, 但两类试件与各自疲劳强度对应的疲劳变形模量比 E_n/E_0 相近, 均在 0.48 左右; 无论是常温试件还是低温试件, 经历 200 万次循环而未发生弯曲疲劳破坏的 UHPC 试件, 其疲劳后的剩余强度均与单调加载时的静力强度接近。基于试验结果, 提出了 20 °C 和 -10 °C 两种温度下 UHPC 的疲劳寿命方程。

关键词: 超高性能混凝土; 低温环境; 疲劳寿命; 疲劳强度; 疲劳变形模量

中图分类号: TU528.572 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)02-0473-09

网络出版时间: 2022-01-20



Flexural Fatigue Properties of Ultra-High Performance Concrete at -10 °C

FANG Zhi^{1,2}, ZHU Qimu¹, LIU Shaokun¹, TAN Xingyu¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The fatigue properties of ultra-high performance concrete (UHPC) at 20 °C and -10 °C were investigated via flexural fatigue tests under different stress levels. The results show that, the degradation of UHPC flexural fatigue performance and the fatigue strength decrease under a cyclic load with the decrease of temperature due to the cold brittleness characteristics of steel fibers at the cracked section. Compared with the test results at 20 °C, the fatigue strength of UHPC at -10 °C is decreased by 15.6%. Although the fatigue strength of the specimens at a low temperature is lower than that of the specimens at normal temperature, their fatigue deformation modulus ratios (E_n/E_0) corresponding to their fatigue strengths are similar, which are 0.48. The residual strength of UHPC specimens undergoing 2 million cycles without flexural fatigue failure is close to the static strength under monotonic loading, at normal temperature or low temperature. Based on the results, a model of predicting the fatigue life of UHPC at 20 °C and -10 °C was proposed, and the predicted results could be used as reference in the practical application.

Keywords: ultra-high performance concrete; low temperature; fatigue life; fatigue strength; fatigue deformation modulus

超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC)是一种具有超高抗压强度、较高抗拉强度、良好韧性和优异耐久性的新型水泥基复合材料, 在土木工程中具有良好的应用前景且已有较为广泛的工程应用实例^[1-3]。

借助 UHPC 的高强, 可形成较轻薄构件而使结构自重大幅降低, 由此导致活载作用下结构内会存在较大的应力幅, 疲劳问题有可能成为控制这类

UHPC 结构设计的关键问题。

工程结构中, UHPC 承受弯拉作用的情形普遍, 使得 UHPC 的弯拉性能成为其基本的力学性能之一。对于在冰点以下低温环境中服役的 UHPC 结构, UHPC 内部孔隙水的结冰会对其物理力学性能产生影响, 同时钢纤维的冷脆特征, 亦会影响 UHPC 的弯曲疲劳性能。因此, 低温环境下 UHPC 材料的性能会有别于其常温下的性能, 也使得不同温度下

收稿日期: 2021-09-24。 修订日期: 2021-11-01。

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: 2021-09-24. Revised date: 2021-11-01.

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

E-mail: fangzhi@hnu.edu.cn

UHPC 材料弯曲疲劳性能的研究极具价值。

迄今国内外学者对常温和高温下 UHPC 的弯曲疲劳性能进行了较多研究。Chanbillard 等^[4]通过常温下的三点弯曲疲劳试验,研究了钢纤维增强 UHPC 的弯曲疲劳性能,结果表明:UHPRC(ultra-high performance fibre reinforced concrete)的弯曲疲劳性能优于普通高强混凝土。石成恩^[5]试验研究了纤维掺量和纤维种类对常温下 RPC(reactive powder concrete)弯曲疲劳性能的影响,结果表明:纤维掺量对 RPC 的疲劳寿命影响显著,纤维种类会影响 RPC 的破坏形态。Al-Azzawi 等^[6]进行了常温下 UHPRC 板的三点弯曲疲劳试验,结果表明:钢纤维分布对疲劳性能有较大影响。金文等^[7]对掺入不同种类纤维 UHPC 的弯曲疲劳性能进行了试验研究,结果表明:掺入钢纤维、聚丙烯纤维和钢-聚丙烯混杂纤维的 UHPC 的弯曲疲劳寿命均较好地服从两参数威布尔分布。José-D Ríos 等^[8]研究了高温下 UHPRC 的弯曲疲劳性能,结果表明:UHPRC 会因高温蒸发形成的水蒸汽压力不易通过孔隙予以释放而产生较严重的基体损伤,进而显著影响其静力性能和疲劳性能。

总之,在 UHPC 的弯曲疲劳性能研究方面,现有研究主要集中于常温或高温下 UHPC 的弯曲疲劳性能,而对低温环境下 UHPC 弯曲疲劳性能的研究仍鲜见报道。因此,将对 20 ℃ 常温与-10 ℃ 低温下 UHPC 的弯曲疲劳性能进行试验研究,以期明确低温环境下 UHPC 的弯曲疲劳性能的不同变化特征,为 UHPC 的工程推广应用提供可靠依据。

1 实验

1.1 原材料

采用 UHPC 商品预混料,设计强度为 150 MPa,其配合比见表 1。采用平直型镀铜钢纤维,其长度为 13 mm,直径为 0.22 mm,抗拉强度 $\geq 2\,000$ MPa,纤维体积掺量为 2%。

表 1 UHPC 配合比
Table 1 Mixture proportion of UHPC

Mass ratio					Water/ binder ratio
Cement	Fly ash	Silica fume	Mineral powder	Quartz sand	
1.00	0.10	0.25	0.15	1.10	0.18

1.2 试件制作与养护

基于《纤维混凝土试验方法标准》^[9]与法国 UHPC 规范^[10],结合低温加载设备对试件的尺寸要

求,最终采用 40 mm×40 mm×160 mm 矩形截面试件。

试件浇筑前在支座截面距端部 20 mm 处预埋 K 型热电偶,用以实时监控试验全过程中试件的内部温度变化。热电偶预埋完成后,试件通过钢模免振捣自流浇筑成型,经过 48 h 自然养护后拆模,再进行 48 h 高温蒸汽养护(90±2) ℃,待自然冷却后,在室温下保存 7 d 后进行弯曲疲劳试验。

依据《活性粉末混凝土》的规定^[11],同批制备边长 100 mm 的立方体试块及 100 mm×100 mm×300 mm 的棱柱体试块并与弯拉试件同条件养护,用以测量 20 ℃ 与-10 ℃ 下 UHPC 的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量,结果如表 2 所示。可知随着温度的降低,UHPC 的立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均有所提高,提高幅度在 4%~8%。

表 2 UHPC 的力学性能
Table 2 Mechanical properties of the UHPC

Temperature/℃	f_{cu} /MPa	f_c /MPa	f_{ts} /MPa	E /GPa
20	163.90	144.40	25.10	48.50
-10	172.80	153.10	27.10	50.20
-10 ℃/20 ℃	1.05	1.06	1.08	1.04

Notes: f_{cu} , f_c , f_{ts} and E refer to the cubic compressive strength, prismatic compressive strength, splitting tensile strength and compressive elastic modulus of UHPC, respectively. The results of strength and elasticity modulus are the average values of 3 specimens in each group.

1.3 方案

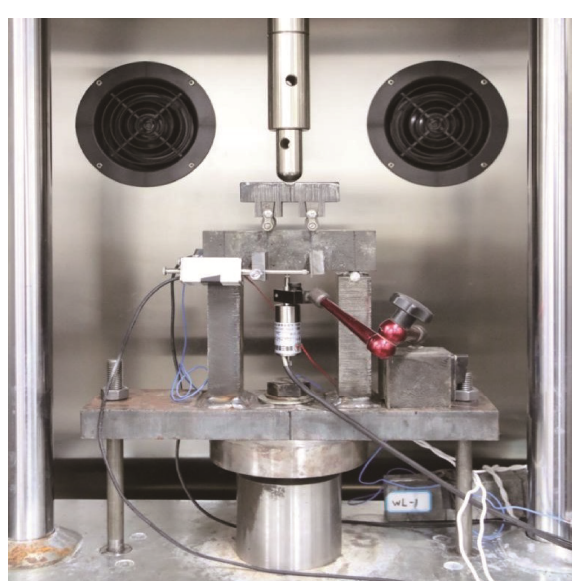
1.3.1 试验装置 试验加载及测点布置如图 1 所示。加载装置采用带恒温功能的 UTM-30 多功能材料试验机,可实时显示恒温箱内温度、力传感器与位移传感器数值,保证试件在试验过程中均处于指定温度;因 UTM-30 试验机降温速度较慢,故试件温度采用高低温交变试验箱实现,先将试件置于试验箱中,待内部热电偶传感器数值达到目标温度时,再将试件移至 UTM-30 试验机内;裂缝观测采用 ZBL-F101 型裂缝测宽仪;变形数据采用 JM3812 静态应变测试仪采集。

1.3.2 测点布置 通过测量 UHPC 试件的变形来衡量疲劳损伤,相关测点布置如下。

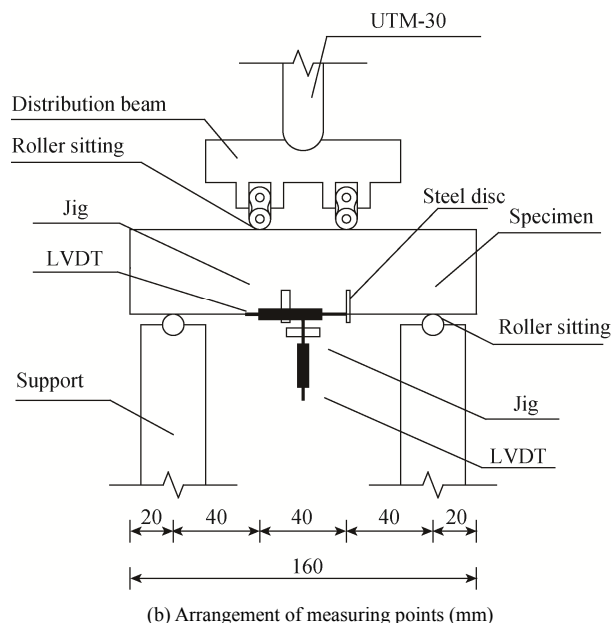
1) 跨中布置竖向位移计,以获取疲劳荷载作用下的跨中挠度;

2) 在纯弯段受压区布置电阻式应变片,以测量试件顶缘的压应变;

3) 在纯弯段受拉区布置电阻式应变片,以测量开裂前底缘的拉应变;同时在试件纯弯区段内侧面底部沿试件纵向布置 2 个高精度位移计,以测量试件开裂后底缘纯弯区段内的平均拉应变。



(a) Arrangement of loading



(b) Arrangement of measuring points (mm)

图 1 加载布置图

Fig. 1 Loading setup

1.3.3 加载方案 弯曲疲劳试验与疲劳后静载破坏试验均采用图 1 所示的四点加载方式, 其支座中心间距 120 mm, 跨中纯弯段长 40 mm。分配梁与试件均设置为简支边界。

疲劳试验采用荷载控制, 加载波形为连续等幅正弦波, 频率为 5 Hz, 每一循环内的荷载上、下限值见表 3。在 0、1、2、5、10、20、50、100、150、200 万次荷载循环后, 若试件未发生疲劳破坏, 则暂停疲劳加载, 进行 1 次加卸载循环的静力试验, 静力加载上限值取疲劳荷载上限; 若试件在达到 200 万次荷载循环之前发生破坏, 破坏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, 进行静载破坏试验。静载破坏试验基于《纤维混凝土试验方法标准》^[9], 采用位移控制单调加载, 加载速率为 0.04 mm/min, 直至试件破坏。

疲劳应力幅以静力试验开裂强度为基准, 设置不同的应力水平。试件的静力试验结果如表 3 所示, 可见: 相较于 20°C 下的试件, -10°C 下 UHPC 的弯拉强度均有所提高, 弯拉初裂强度和极限抗拉强度分别提高了 10.2% 和 7.7%。

定义疲劳加载的应力水平 S = 最大应力 $\sigma_{\max}$ / 静力弯拉极限强度 f_{bu} ; 应力比 R = 最小应力 $\sigma_{\min}$ / 最大应力 $\sigma_{\max}$, 为防止作动器与分配梁脱空, 取 $R=0.1$; 应力幅 $\Delta S = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。这里的应力均为按整体截面计算的受拉边缘的名义拉应力。

弯拉试件及相应的应力水平亦列于表 3。 20°C 试件的应力水平在 0.4~0.8 之间, 其中应力水平为 0.4 时, 初始加载下试件未开裂, 其余应力水平时, 初始加载下试件均已开裂; -10°C 试件的应力水平在 0.56~0.7 之间, 初始加载下试件均已开裂。

表 3 基本试验参数

Table 3 Basic experimental parameters

Specimen group	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Static cracking strength f_{bc}/MPa	Static limit strength f_{bu}/MPa	Stress level	Stress Ratio	Upper limit stress/MPa	Upper limit load /kN	Lower limit load /kN
BT-F2-T(20)-0.40	20	16.33	31.64	0.40	0.1	12.65	6.75	0.68
BT-F2-T(20)-0.60	20	16.33	31.64	0.60	0.1	18.98	10.12	1.01
BT-F2-T(20)-0.70	20	16.33	31.64	0.70	0.1	22.16	11.82	1.18
BT-F2-T(20)-0.75	20	16.33	31.64	0.75	0.1	23.74	12.66	1.27
BT-F2-T(20)-0.80	20	16.33	31.64	0.80	0.1	25.31	13.50	1.35
BT-F2-T(-10)-0.56	-10	18.00	34.09	0.56	0.1	18.92	10.08	1.01
BT-F2-T(-10)-0.60	-10	18.00	34.09	0.60	0.1	20.63	11.00	1.10
BT-F2-T(-10)-0.70	-10	18.00	34.09	0.70	0.1	24.07	12.84	1.28

Notes: BT means bending test, F2 represents the steel fiber content in volume of 2%, T and the following number in bracket means the test temperature; the last number refers to the stress level.

2 结果与讨论

2.1 疲劳试验现象

常温试件 BT-F2-T(20)-0.40(常温应力水平为 0.40 试件,下同)、常温应力水平为 0.60 试件、常温应力水平为 0.70 试件和低温试件 BT-F2-T(-10)-0.56(低温应力水平为 0.56 试件,下同)等 4 个试件经 200 万次荷载循环后尚未发生疲劳破坏而进行静力加载使其破坏,其余试件均发生疲劳破坏。

BT-F2-T(20)-0.40 试件疲劳应力上限小于其开裂强度,初始静力荷载达到疲劳上限值时,试件未出现开裂。当荷载循环 1 万次时,试件纯弯段底部出现了 1 条 0.02 mm 宽的裂缝,但在随后的循环加载中,裂缝宽度保持稳定,未见明显增长。

由于疲劳循环加载过程中难以跟踪测量每条裂缝的宽度发展,考虑到试件弯拉开裂后,纯弯区段受拉边缘的应变或伸长主要反映的是区段内裂缝宽度的开展,因此可不失合理性地假定区段内受拉伸长即为全部裂缝宽度增量之和。

BT-F2-T(20)-0.60 试件、BT-F2-T(20)-0.70 试件和 BT-F2-T(-10)-0.56 试件的初始静力荷载达到疲劳上限值时,试件均已开裂。此时 BT-F2-T(20)-0.60 试件和 BT-F2-T(20)-0.70 试件纯弯段底部分别出现 2 条宽度总和为 0.03 mm 的裂缝与 3 条宽度总和为 0.05 mm 的裂缝,经过 200 万次荷载循环后裂缝宽度总和分别增至 0.12 mm 与 0.22 mm,总的裂缝宽度分别增加到初始值的 4 倍和 4.4 倍;BT-F2-T(-10)-0.56 试件初始开裂时纯弯段底部出现 1 条 0.02 mm 裂缝,经过 200 万次荷载循环后裂缝宽度总和增至 0.07 mm,总的裂缝宽度增加到初始值的 3.5 倍。

BT-F2-T(20)-0.75 试件和 BT-F2-T(20)-0.80 试件及 BT-F2-T(-10)-0.60 试件和 BT-F2-T(-10)-0.70 试件均在 200 万次循环内发生弯曲疲劳破坏。不同温度下

试件的疲劳破坏形态相似,均表现为纯弯段的脆性断裂,如图 2 所示。但两类试件破坏时的裂缝分布存在一定差别,如图 3 所示。疲劳破坏时,常温试件的裂缝数量较多、间距较小,而低温试件的裂缝却表现为少而稀,可能是由于低温下液态水结冰,降低了混凝土的孔隙率,增加了 UHPC 的均匀性,从而降低了裂缝开展的随机性^[12–13]。

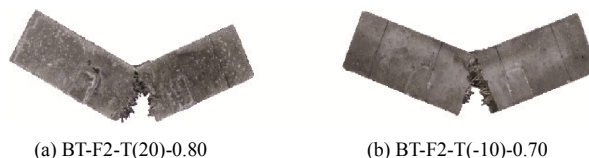


图 2 试件疲劳破坏形态

Fig. 2 Failure modes of specimens under fatigue load

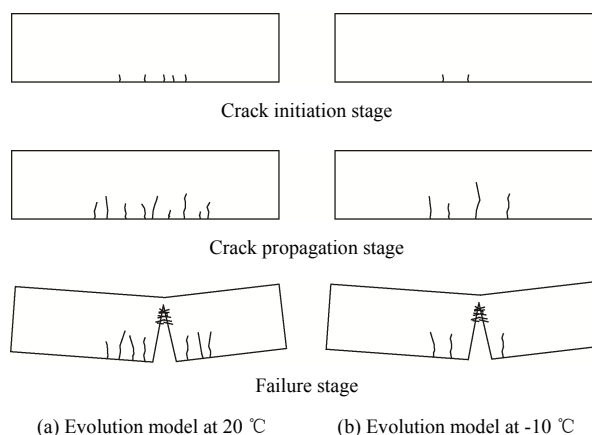


图 3 不同温度下试件的裂缝分布

Fig. 3 Crack distribution on the specimens

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,试件直至破坏时的加载次数。这里定义试件疲劳寿命达到 200 万次时,将其视为无限寿命^[14]。各试件的疲劳寿命汇总如表 4。若荷载循环达到 200 万次时,试件仍未发生弯曲疲劳破坏,则将其疲劳寿命记为 200 万次。

表 4 疲劳试验结果
Table 4 Fatigue test results

Specimen code	Temperature / °C	Stress level	Stress ratio	Upper load/kN	Lower load/kN	Fatigue life <i>N</i> /times
BT-F2-T(20)-0.40	20	0.40	0.1	6.75	0.68	2 000 000
BT-F2-T(20)-0.60	20	0.60	0.1	10.12	1.01	2 000 000
BT-F2-T(20)-0.70	20	0.70	0.1	11.82	1.18	2 000 000
BT-F2-T(20)-0.75	20	0.75	0.1	12.66	1.27	1 119 090
BT-F2-T(20)-0.80	20	0.80	0.1	13.50	1.35	101 545
BT-F2-T(-10)-0.56	-10	0.56	0.1	10.08	1.01	2 000 000
BT-F2-T(-10)-0.60	-10	0.60	0.1	11.00	1.10	884 285
BT-F2-T(-10)-0.70	-10	0.70	0.1	12.84	1.28	332 590

由表 4 可知: 在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下, 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 0.70 和 0.56; 应力水平分别为 0.60 和 0.70 时, 循环荷载作用前, 在初次施加到疲劳荷载上限时试件即已开裂, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下试件的寿命均为 2 000 000 次, 而 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 试件寿命分别为 884 285 次和 332 590 次, 分别下降了 55.8% 和 83.4%, 亦即 UHPC 材料的抗疲劳性能随着温度的降低而出现明显退化。这源于开裂后 UHPC 的抗拉性能主要取决于其内钢纤维的作用, 而低温下钢纤维的冷脆特征使钢纤维的抗疲劳性能变差, 进而导致 UHPC 的抗疲劳性能劣化。

2.2.2 疲劳方程 双对数坐标下, 不同温度下试件的疲劳寿命的测试结果如图 4 的散点所示, 可见其与 UHPC 的抗压疲劳试验结果类似, 均接近线性关系^[15]。采用最小二乘法对不同温度试件的疲劳试验结果进行线性回归分析, 得到图 4 所示曲线。基于无量纲化的疲劳应力幅比($\Delta S/f_{\text{bu}}$)拟合得到其疲劳方程如表 5 所示。相应的疲劳应力幅比($\Delta S/f_{\text{bu}}$)和疲劳寿命 N 的关系曲线如图 5 所示。

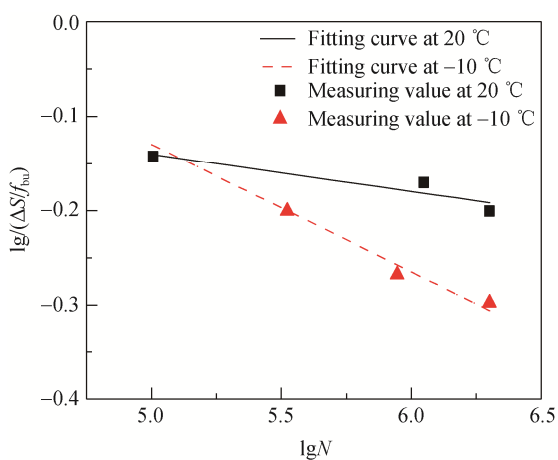


图 4 $\lg(\Delta S/f_{\text{bu}})$ - $\lg N$ 关系曲线

Fig. 4 $\lg(\Delta S/f_{\text{bu}})$ - $\lg N$ curves

表 5 不同温度下 UHPC 疲劳强度方程

Table 5 Fatigue strength equation of UHPC at different temperatures

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Fatigue strength equation	Correlation coefficient
20°C	$\lg(\Delta S/f_{\text{bu}}) = -0.039 4 \lg N + 0.056 6$	0.876
-10°C	$\lg(\Delta S/f_{\text{bu}}) = -0.135 1 \lg N + 0.545 3$	0.988 2

从图 4、图 5 可见: 随着温度降低, UHPC 的弯曲疲劳性能劣化明显, 疲劳强度也明显降低。

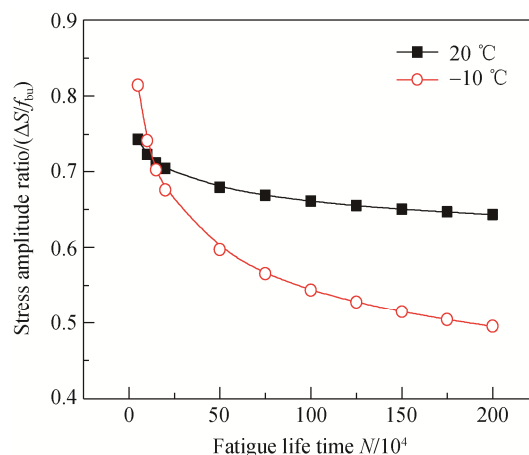


图 5 应力幅比($\Delta S/f_{\text{bu}}$)和疲劳寿命 N 关系曲线

Fig. 5 Stress amplitude ratio - fatigue life curves

2.2.3 疲劳强度 这里定义 UHPC 试件的疲劳强度为 200 万次疲劳寿命下所能承受的最大弯曲疲劳应力^[14]。基于表 5 所列疲劳方程, 可确定不同温度下 UHPC 试件的疲劳强度如表 6 所示。

表 6 不同温度下 UHPC 的疲劳强度

Table 6 Fatigue strength of UHPC at different temperatures

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Stress amplitude ratio	Fatigue strength /MPa	Stress level
20	0.64	22.44	0.71
-10	0.50	18.94	0.56

由表 6 可知: 随着温度的降低, UHPC 的弯曲疲劳强度明显减小。 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, UHPC 的弯曲疲劳应力幅比和疲劳应力水平分别为 0.64 和 0.71, 相应的弯曲疲劳强度为 22.44 MPa; $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下, UHPC 的弯曲疲劳应力幅比和疲劳应力水平分别为 0.50 和 0.56, 相应的弯曲疲劳强度为 18.94 MPa。相比于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 UHPC, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 UHPC 的疲劳强度降低了 15.6%, 疲劳应力水平降低了 21.1%。另从 2 种温度下试件疲劳破坏时的应力水平可以看出, 经历 200 万次循环的 BT-F2-T(20)-0.70 试件和 BT-F2-T(-10)-0.56 试件的破坏, 基本对应于达到所定义疲劳强度时的情形。

2.3 变形特征

UHPC 的弯曲疲劳破坏是一种内部损伤不断累积, 并导致裂纹不断萌生与扩展, 裂缝处的钢纤维不断拔出和断裂, 最终试件突然断裂的脆性破坏过程。这里基于循环一定次数后试件静力加载时的跨中挠度、顶底应变和变形模量的变化从宏观上刻画试件的损伤演化过程^[16]。为此, 当试件分别循环加载至 0、1、2、5、10、20、50、100、150、200 万

次后,若试件未发生疲劳破坏,则暂停疲劳加载,进行1次加卸载循环的静力试验,静力加载上限值取疲劳荷载上限。

各试件纯弯区段受拉和受压边缘应变及跨中挠度的测试结果分别如图6~图8所示,纵坐标为试件静力加载上限值对应的跨中挠度和应变响应,横坐标为循环加载次数与该试件疲劳寿命的比值,即循环次数比。需要说明的是,对于疲劳寿命少于200万次的试件,曲线上的最后1个数据点为疲劳破坏前最近1次的静载测试结果,有些试件并未捕捉到接近疲劳破坏时的循环次数,因此该点对应的循环次数比(实时循环次数 n 与疲劳寿命 N 之比) n/N 会小于1.0。

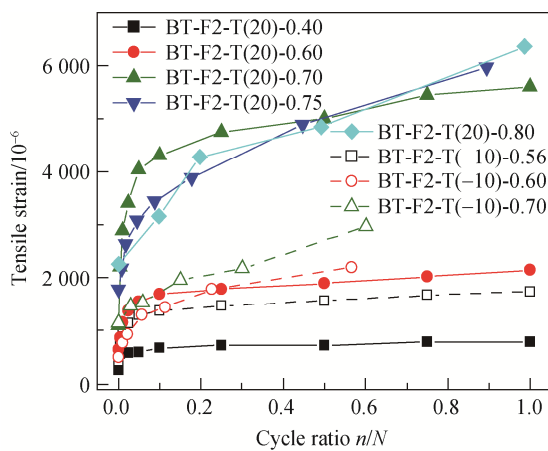


图6 底部拉应变-循环次数比变化曲线

Fig. 6 Tensile strain at bottom edge - cycle ratio curves

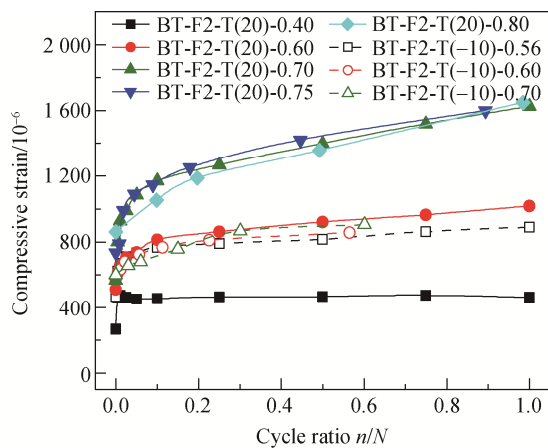


图7 顶部压应变-循环次数比变化曲线

Fig. 7 Compressive strain at top edge - cycle ratio curves

UHPC 弯拉试件的疲劳破坏主要是由其受拉区开裂截面的受拉性能所控制。因此,图6所示受拉边缘的应变发展更能直接反映试件的受力破坏过程。这里试件受拉边缘的应变为图1所示底部纵向位移计所测得纯弯区段内的平均拉应变,且取底部

两侧2个位移计读数的平均值。

由图6可知:

1) 20℃下, BT-F2-T(20)-0.40、BT-F2-T(20)-0.60和 BT-F2-T(20)-0.70 等试件的循环次数均达到200万次,其受拉应变发展均表现出2阶段的发展特征。循环次数比 n/N 约在0.05之前的第1阶段,应变发展迅速,曲线陡然上升,随后进入第2阶段。进入第2阶段以后,虽然随着应力水平的提高,应变增加速率逐渐增大(200万次循环下,应力水平从0.40增加到0.60和0.70时,应力水平仅分别增50%和75%,应变却分别增加了153%和596%),但应变增加速率却逐渐减缓而最终收敛于各自的疲劳极限应变(循环次数达到200万次时的应变);而对于 BT-F2-T(20)-0.75 和 BT-F2-T(20)-0.80 这2个试件,分别约在111.91万次和10.15万次发生了疲劳破坏,第1阶段的循环次数比分别位于0.05和0.15左右,进入第2阶段后,其应变的增加速率明显加快, BT-F2-T(20)-0.80 试件甚至出现了应变速率再次增大的第3阶段,最终因应变发散而均在200万次之前发生破坏。从受拉应变的发展形态也可看到,常温 UHPC 弯曲疲劳应力水平应介于0.70和0.75之间,验证了前面疲劳强度对应的应力水平为0.71的合理性。

2) -10℃下, BT-F2-T(-10)-0.56 试件的循环次数达到了200万次,其受拉应变发展表现出明显的2阶段发展特征。循环次数比 n/N 约在0.05之前的第1阶段,应变发展迅速,曲线陡然上升,随后进入第2阶段,应变增加速率逐渐减缓而最终收敛于相应的疲劳极限应变;而 BT-F2-T(-10)-0.60 和 BT-F2-T(-10)-0.70 试件疲劳破坏时的循环次数分别约为88.43和33.26万次,均远少于200万次,虽然2个试件亦于循环次数比 n/N 约0.05时进入第2阶段,但进入第2阶段后,随着应力水平的提高,应变增加速率也明显增大, BT-F2-T(-10)-0.70 试件出现了应变速率再次增大的第3阶段。从受拉应变的发展形态也看到,低温 UHPC 试件的弯曲疲劳应力水平介于0.56和0.60之间,验证了前面疲劳强度对应的应力水平为0.56的合理性。

3) 与 BT-F2-T(20)-0.60 和 BT-F2-T(20)-0.70 试件相比,相同应力水平下, BT-F2-T(-10)-0.60 和 BT-F2-T(-10)-0.70 试件第1阶段以后相应拉应变的增加速率明显增大,表明其疲劳劣化程度的明显加剧,与前面图4和图5疲劳寿命曲线的规律一致。

图7为试件顶部压应变随循环次数增加的发展曲线。可以看出:

1) 由于所有试件的压应力上限均远小于相应 UHPC 的抗压强度, 使得顶部压应变的发展历程均表现为两阶段的发展规律。

2) BT-F2-T(20)-0.70、BT-F2-T(20)-0.75 和 BT-F2-T(20)-0.80 等 3 个试件, 拉应力上限最大相差仅为 14.2%, 顶缘最大压应力相差更小, 所以这 3 个试件顶缘压应变的变化历程相近, 而 BT-F2-T(20)-0.40 试件比这 3 个试件的拉应力上限值小 75.2%~100.1%, 因此相同循环次数比下压应变的幅值较低且第 2 阶段的增加速率亦较小。BT-F2-T(20)-0.60 试件的应变幅值和第 2 阶段的增加速率介于上述两类试件之间。

3) BT-F2-T(-10)-0.56、BT-F2-T(-10)-0.60 和 BT-F2-T(-10)-0.70 等 3 个试件的拉应力上限值最大相差 27.2%, 顶缘最大压应力相差更小, 因此相同循环次数比下压应变的变化历程相近。相同应力水平下, 低温试件的顶缘压应变较常温试件低, 可能是由于低温试件的受压弹性模量有所增加所致。

图 8 为试件跨中总挠度随循环次数增加的发展曲线。可以看出: 由于初始加载时已开裂试件的挠度发展主要源于受拉裂缝的宽度增加, 亦主要反映受拉区 UHPC 的形态变化, 故其发展规律与受拉边缘应变的发展规律相似, 仅 BT-F2-T(-10)-0.70 试件的挠度发展更快, 这主要是 BT-F2-T(-10)-0.70 试件的应力水平超过相应 UHPC 疲劳强度的幅度最大, 达 25%, 使得其疲劳变形模量的退化最为剧烈(见下文的分析结果), 因此, 相应的变形增大, 增加的速率也更快。

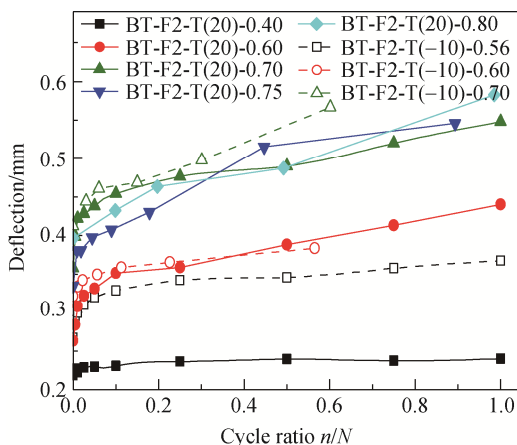


图 8 跨中挠度-循环次数比变化曲线

Fig. 8 Mid-span deflection - cycle ratio curves

2.4 疲劳变形模量

以疲劳变形模量来衡量疲劳荷载作用下 UHPC

材料的刚度退化^[17]。定义疲劳变形模量 E_s 为荷载循环分别达到 0、1、2、5、10、20、50、100、150 和 200 万次时静载试验受拉边缘的名义拉应力幅与拉应变幅之比即此刻的割线模量, 如式(1)所示。

$$E_s = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) \quad (1)$$

疲劳变形模量比与循环次数比的变化曲线如图 9 所示, 疲劳破坏前最近 1 次测得的变形模量如表 7 所示。图 9 和表 7 中的 E_0 为试件初始加载时的变形模量, E_n 为试件最后 1 次加载时的变形模量。需要说明的是, 表 7 中的 BT-F2-T(-10)-0.60 和 BT-F2-T(-10)-0.70 试件, 其疲劳破坏寿命分别为 88.43 万次和 33.26 万次, 分别与破坏前最近 1 次测试时的循环次数 50 万次和 20 万次相距较远, 因此表 7 这 2 个试件变形模量的衰减退化出现异常。

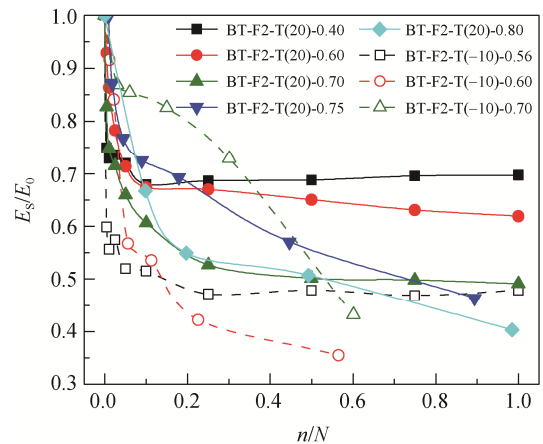


图 9 变形模量比-循环次数比曲线

Fig. 9 Fatigue deformation modulus ratio - cycle ratio curves

由图 9 和表 7 可知: 无论是常温试件还是低温试件, 其疲劳破坏时的变形模量均随应力水平增大而减小。当应力水平不超过其疲劳强度对应的应力水平时, 试件的疲劳变形模量均在早期快速衰减后趋于稳定并在 200 万次循环时收敛于一稳定值; 当应力水平大于其疲劳强度对应的应力水平时, 随循环次数的增加, 试件的疲劳变形模量单调下降直至疲劳破坏, 不存在趋于稳定的收敛特征, 且低温试

表 7 疲劳变形模量

Table 7 fatigue deformation modulus

Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Stress level	E_0/GPa	E_n/GPa	E_n/E_0
20	0.40	47.14	33.83	0.70
20	0.60	27.93	17.28	0.62
20	0.70	19.08	9.37	0.49
20	0.75	18.26	8.47	0.46
20	0.80	16.94	7.11	0.42
-10	0.56	43.22	20.67	0.48
-10	0.60	42.39	15.02	0.35
-10	0.70	33.46	14.46	0.43

件的变形模量因其内钢纤维的冷脆而衰减更快。此外, BT-F2-T(-10)-0.70 试件的应力水平超过相应疲劳强度对应的应力水平时的幅度最大, 达 25%, 使得其疲劳变形模量的退化最为剧烈。

值得注意的是, 对比常温应力水平 0.70 试件和低温应力水平 0.56 试件, 二者均基本对应 200 万次的疲劳破坏亦即基本对应各自的疲劳强度, 虽然低温试件的疲劳强度低于常温试件, 但与疲劳强度对应的疲劳变形模量比 E_n/E_0 相近, 均在

0.48 左右。

2.5 剩余强度

疲劳试验结束后, 对经历 200 万次荷载循环尚未发生破坏的试件进行静载破坏试验, 得到疲劳后各试件的剩余强度, 并与未经历疲劳荷载的静载试验结果进行对比, 结果如表 8 所示。由表 8 可知: 无论是常温试件还是低温试件, 当其 200 万次荷载循环后尚未发生破坏时, 其疲劳后的剩余强度均与静力试件的静载试验结果接近。

表 8 疲劳后的剩余强度
Table 8 Residual strength after fatigue

Specimen code	Temperature/°C	Static strength/ MPa	Residual strength after fatigue /MPa	Fatigue/static
BT-F2-T(20)-0.40	20	31.64	31.93	1.01
BT-F2-T(20)-0.60	20	31.64	33.83	1.07
BT-F2-T(20)-0.70	20	31.64	33.47	1.06
BT-F2-T(-10)-0.56	-10	34.09	34.58	1.01

3 结论

1) 随着温度的降低, 由于试件开裂截面钢纤维的冷脆特征, 使得循环荷载作用下 UHPC 弯曲疲劳性能的退化明显加剧, 疲劳强度也明显降低。相比于 20 °C 的 UHPC, -10 °C UHPC 的疲劳强度降低了 15.6%。

2) 无论是常温试件还是低温试件, 均随应力水平增大, 疲劳破坏时的变形增大、变形模量减小。当应力水平不超过相应疲劳强度对应的应力水平时, 试件的变形和变形模量均在早期分别快速增加和衰减后趋于稳定并在 200 万次循环时收敛于一稳定值; 当应力水平大于相应的疲劳强度时, 随循环次数的增加, 试件的变形和变形模量分别单调增加和下降直至疲劳破坏, 不存在趋于稳定的收敛特征, 且低温试件的变形模量因其内部钢纤维的冷脆特征而衰减更快。

3) 虽然低温试件的疲劳强度低于常温试件, 但两类试件与各自疲劳强度对应的疲劳变形模量比 E_n/E_0 相近, 均在 0.48 左右。

4) 无论是常温试件还是低温试件, 经历 200 万次循环而未发生弯曲疲劳破坏的 UHPC 试件, 其疲劳后的剩余强度均与静载强度接近。

参考文献:

[1] LARRARD D 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. Reactive Powder concretes with high ductility and 200–800 MPa compressive strength[J]. ACI Spec Publ, 1994, 144(24): 507–518.

[3] 陈宝春, 季韬, 黄卿维, 等. 超高性能混凝土研究综述[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(3): 1–24.

CHEN Baochun, JI Tao, HUANG Qingwei, et al. J Arch Civ Eng(in Chinese), 2014, 31(3): 1–24.

[4] CHANVILLARD G, PIMIENTA P, PINEAUD A, et al. Fatigue flexural behavior of pre-cracked specimens of DUCTAL®UHPFRC [C]. 6th RILEM Symposium on Fibre-Reinforced, Concretes BEFIB' 2004.

[5] 石成恩. 活性粉末混凝土(RPC)的弯曲疲劳寿命研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.

SHI Chenen. Research of bending fatigue life of reactive powder concrete(RPC). (in Chinese, dissertation). Fuzhou University, 2005.

[6] AL-AZZAWI B S, KARIHALOO B L. Flexural fatigue behavior of a self-compacting ultrahigh performance fiber-reinforced concrete[J]. J Mater Civ Eng, 2017, 29(11): 1–9.

[7] 金文. 超高性能混凝土弯曲疲劳性能及破坏中裂缝发展研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

JIN Wen. Investigation of the bending fatigue performance and cracking processes of ultra high performance concrete. (in Chinese, dissertation). South China University of Technology, 2018.

[8] JOSÉ D R, HÉCTOR CIFUENTES, SERGIO BLASÓN, et al. Flexural fatigue behaviour of a heated ultra-high-performance fibre-reinforced concrete.[J]. Constr Build Mater, 2021, 276: 122209.

[9] CECS 13: 2009. 纤维混凝土试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.

CECS 13: 2009. Standard test methods for fiber reinforced concrete[S].

- Beijing, China, 2010(in Chinese).
- [10] NF P 18-470 Concrete—Ultra-high performance fibre-reinforced concrete — Specifications, performance, production and conformity[S]. French Standard, AFNOR — French standard institute, 2016.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- GB/T 31387-2015, Chinese National Standard, Reactive Powder Concrete[S]. Beijing, China, 2015 (in Chinese).
- [12] 张楠, 廖娟, 戢文占, 等. 混凝土低温力学性能及试验方法[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(11): 1404-1408.
- ZHANG Nan, LIAO Juan, JI Whenzhan, et al. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(11): 1404-1408.
- [13] NA RAYANAN NEITHA LATH, MILANI S SUMANASOO RIY A, et al. Characterizing pore volume, sizes, and connectivity in previous concretes for permeability prediction[J]. Mater Charact, 2010, 61(8): 802.
- [14] 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. J Hunan Univ(Nat Sci Ed in Chinese), 2011, 38(6): 6-12.
- [15] 余自若, 安明喆, 阎贵平. 活性粉末混凝土的疲劳性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008(4): 35-40.
- YU Ziruo, AN Mingzhe, YAN Guiping. ZHOU Ruizhong. Chin Railway Sci(in Chinese), 2008(4): 35-40.
- [16] 杨德滋, 车惠民. 混凝土在重复荷载作用下疲劳寿命分布的概率方法研究[J]. 铁道学报, 1990(4): 56-65.
- YANG Dezi, CHE Huimin. J Chin Railway(in Chinese), 1990(4): 56-65.
- [17] 刘绍琨. 低温环境下超高性能混凝土抗弯拉疲劳性能的试验[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- LIU Shaokun. Study on flexural fatigue performance of ultra-high performance concrete under low temperatureI. (in Chinese, dissertation). HunanUniversity, 2020.