

文章编号:1007-9629(2022)04-0381-08

含粗骨料超高性能混凝土单轴受压疲劳性能

李力剑, 徐礼华*, 池寅, 黄宇雷, 徐凡丁

(武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:对含粗骨料超高性能混凝土(UHPC(CA))进行单轴受压疲劳试验,重点考察其疲劳破坏形态、疲劳变形、疲劳寿命及疲劳强度.在此基础上,分析了UHPC(CA)疲劳破坏全过程,建立了基于Weibull分布的存活率-应力水平-疲劳寿命(p - S - N)方程.结果表明:UHPC(CA)疲劳破坏形态为剪切破坏,破坏时试件呈现1条或2条主裂缝;UHPC(CA)疲劳破坏断面分为疲劳区和裂纹扩展区,疲劳区有明显的反复摩擦痕迹;UHPC(CA)疲劳变形发展呈现明显的三阶段特征,即微裂纹萌生发展阶段、微裂纹稳定发展和宏观裂缝萌生阶段、宏观裂缝发展阶段;UHPC(CA)单调应力-应变曲线仅在高应力水平($S \geq 0.8$)下可作为其疲劳变形的包络线;UHPC(CA)具有95%存活率的疲劳强度为61.78 MPa,对应的应力水平为0.520.

关键词:含粗骨料超高性能混凝土;疲劳试验;疲劳变形;疲劳寿命;疲劳方程

中图分类号:TU528.572

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.04.008

Fatigue Performance of Ultra-high Performance Concrete Containing Coarse Aggregate under Uniaxial Cyclic Compression

LI Lijian, XU Lihua*, CHI Yin, HUANG Yulei, XU Fanding

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The fatigue performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregate (UHPC (CA)) was investigated through the uniaxial compressive fatigue test. The fatigue failure pattern, fatigue deformation, fatigue life and fatigue strength of UHPC (CA) were studied. On this basis, the whole failure process of UHPC (CA) under fatigue load was analyzed, and the survival rate-stress level-fatigue life (p - S - N) equation was established based on the Weibull distribution. Results show that the fatigue failure pattern of UHPC (CA) is the shear failure with one or two main cracks. The fatigue failure surface of UHPC (CA) is composed of two zones, fatigue zone with obvious traces of repeated friction and crack propagation zone. Three stages are observed in the fatigue strain evolution curve, namely, micro-crack initiation and development stage, micro-crack stable development and macro-crack initiation stage, and macro-crack development stage. The monotonic stress-strain curve of UHPC (CA) can be used as an envelope of fatigue deformation only at high stress levels ($S \geq 0.8$). The fatigue strength of UHPC (CA) with 95% survival rate can be taken as 61.78 MPa, and the corresponding stress level is 0.520.

Key words: ultra-high performance concrete containing coarse aggregate; fatigue test; fatigue deformation; fatigue life; fatigue equation

超高性能混凝土(UHPC)作为一种可持续、高性能混凝土材料,具有强度高、耐久性好等优良特

收稿日期:2021-01-14; 修订日期:2021-03-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978538)

第一作者:李力剑(1993—),男,河南洛阳人,武汉大学博士生.E-mail: lilijian@whu.edu.cn

通讯作者:徐礼华(1962—),女,安徽潜山人,武汉大学教授,博士生导师,博士.E-mail: xulihuad@163.com

性,自问世20余年以来一直为国内外土木工程界所瞩目.迄今,UHPC可分为活性粉末混凝土(RPC)和含粗骨料超高性能混凝土(UHPC(CA))两类.RPC对原材料要求严格,制备工艺复杂,生产成本高,其推广应用受到一定限制.而UHPC(CA)因其原料易取、制备简单、成本较低等优势而更具竞争力,工程应用前景更加广阔.

UHPC结构在长期服役过程中,除了需要在静力荷载作用以及高应力状态下工作之外,还需要抵抗频繁的循环动荷载.这种具有周期性循环特性的疲劳荷载会引起UHPC内部应力场不断变化及重分布,推动内部初始微裂纹的不断萌生和发展,进而引起UHPC力学性能的渐进性劣化,最终导致材料及结构在低于容许应力之下发生疲劳破坏.因此,弄清UHPC在疲劳荷载下的力学行为,对UHPC构件或结构的设计计算至关重要.

UHPC现有研究主要以静力性能为主^[1-4],而对其疲劳性能研究尚属起步阶段.余自若等^[5]研究了RPC受压疲劳性能,发现RPC具有优于普通混凝土的抗疲劳开裂能力.在此基础上,方志等^[6]研究了钢纤维掺量对RPC受压疲劳性能的影响,发现RPC疲劳寿命和疲劳强度随着钢纤维掺量的增大而提高.现有研究并

未考虑粗骨料的掺入对UHPC单轴受压疲劳性能的影响.研究表明^[7],钢纤维以粗骨料为中心环绕分布,粗骨料的掺入会对钢纤维分布产生不利影响.同时,粗骨料的掺入也会引入更多薄弱的界面过渡区,影响材料微结构组成,进而影响材料整体性能.因此,有关RPC疲劳性能的研究成果不能完全适用于UHPC(CA).本文通过单轴受压疲劳试验,研究UHPC(CA)的单轴受压疲劳性能,探讨其疲劳破坏形态、疲劳变形、疲劳寿命及疲劳强度,建立UHPC(CA)的存活率-应力水平-疲劳寿命(p - S - N)方程,为UHPC(CA)的抗疲劳设计和工程应用提供参考.

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

基于课题组前期研究成果^[2-3],UHPC(CA)配合比见表1(其中 m_w/m_b 为水胶比¹⁾, φ_{st} 为钢纤维体积分数).主要原材料为:P·O 52.5普通硅酸盐水泥(28 d抗压强度58.3 MPa)、矿渣粉(活性指数105%)、硅粉(活性指数130%)、0.212~0.425 mm精制石英砂、粒径5~10 mm玄武岩碎石、聚羧酸系高效减水剂(减水率大于35%)和镀铜光面平直钢纤维(长度12 mm,长径比60,抗拉强度2 750 MPa).

表1 UHPC(CA)配合比
Table 1 Mix proportion of UHPC(CA)

Mix proportion/(kg·m ⁻³)							m_w/m_b	$\varphi_{st}/\%$
Cement	Silica fume	Slag powder	Water	Admixture	Quartz sand	Basalt		
730	91	91	146	29	1 113	265	0.16	2

1.2 试件设计及制作

为研究UHPC(CA)的高周和低周疲劳特性,本文试验以应力水平 S 作为主要影响因素,设置0.9、0.8、0.7、0.6、0.5共5个应力水平,每个应力水平包含5个平行试件.选用尺寸为100 mm×100 mm×

300 mm的棱柱体试件进行静载和疲劳试验.另外浇筑3个边长为100 mm的立方体试件,用于测试UHPC(CA)的立方体抗压强度.

UHPC(CA)试件的浇筑过程见图1.脱模后,进行48 h蒸汽养护,待自然冷却后,移入标准养护室养护至28 d.

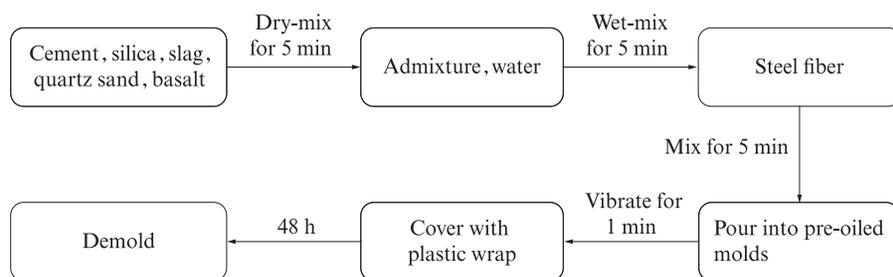


图1 试件浇筑全过程

Fig. 1 Whole process of specimen fabrication

1) 本文涉及的水胶比、减水率等除特别说明外均为质量比或质量分数.

1.3 加载方案

单轴受压静载及疲劳试验均在MTS 2 500 kN 电液伺服四立柱动态加载系统上进行.静载试验采用位移控制,加载速率为0.002 mm/s;疲劳试验采用荷载控制,采用正弦波加载,加载频率固定为5 Hz,最小荷载为 P_{min} ,最大荷载为 P_{max} ,且 $P_{min}=0.1P_{max}$,疲劳试验加载制度见图2.试验过程中,利用MTS数据采集系统和FlexTest™ 60 伺服控制器进行数据采集,包括荷载值、位移值和循环次数等.

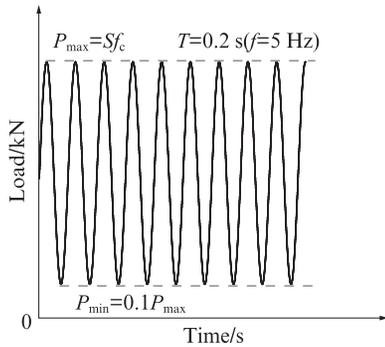


图2 疲劳试验加载制度

Fig. 2 Loading system of fatigue test

根据GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》,以1.2 MPa/s的加载速率进行立方体抗压强度试验,得到UHPC(CA)立方体试件28 d抗压强度平均值 f_{cu} =

135.4 MPa;利用位移控制加载,得到UHPC(CA)棱柱体试件抗压强度平均值 $f_c=118.8$ MPa.

2 试验结果及分析

2.1 疲劳破坏形态

各应力水平下UHPC(CA)试件的疲劳破坏形态见图3.由图3可见,试件在疲劳破坏时完整性较好,这是由于钢纤维的掺入显著提高了UHPC基体的阻裂能力和变形能力.已有文献表明^[5-6],掺入钢纤维的RPC疲劳破坏形态为单一主裂缝的剪切破坏,UHPC(CA)则呈现1条或2条主裂缝的剪切破坏形态.这是由于粗骨料的掺入引入了粗骨料-UHPC基体界面过渡区这一力学性能的薄弱环节^[7].在疲劳荷载持续作用下,UHPC(CA)内部会有更多微裂纹的萌生和发展,使得试件中微裂纹的分布更加复杂.在宏观响应上,表现为主裂缝分布的多样性.

UHPC(CA)试件的典型疲劳破坏断面见图4.由图4可见,疲劳破坏断面具有明显的滑移痕迹,断面上可以观察到大量的钢纤维.钢纤维的掺入使UHPC基体裂纹扩展得到了有效延滞,使试件破坏时裂而不散,呈现出延性破坏特征.疲劳破坏断面有2个典型区域:浅灰色的疲劳区和深灰色的裂纹扩展区.粗骨料的掺入,使得UHPC(CA)基体内钢纤维

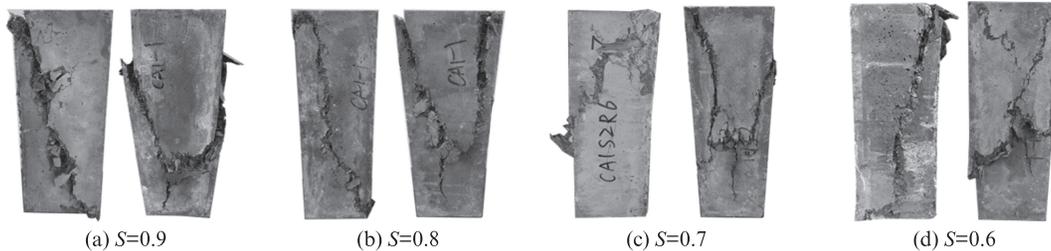


图3 各应力水平下UHPC(CA)试件的疲劳破坏形态

Fig. 3 Fatigue failure patterns of UHPC(CA) specimens under different stress levels

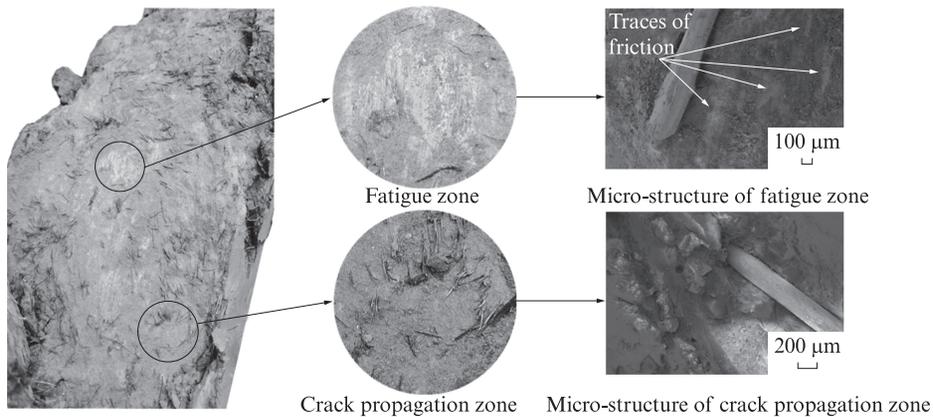


图4 UHPC(CA)试件的典型疲劳破坏断面

Fig. 4 Typical fatigue failure surface of UHPC(CA) specimen

的分布不如RPC均匀.因此,可以明显观察到,疲劳区钢纤维分布较为稀疏.在疲劳荷载作用下,该区域最先开裂后持续受力摩擦,有明显的反复摩擦痕迹,通过扫描电镜(SEM)也可以观察到这一现象.相反,裂纹扩展区钢纤维较多,是基体内部力学性能较好的区域.在试件将要发生疲劳破坏时,裂纹才逐渐由疲劳区发展到裂纹扩展区.因此,与疲劳区不同,裂纹扩展区表面粗糙不平整,没有摩擦痕迹,与静载试验中试件的典型破坏断面相似.

2.2 疲劳变形

2.2.1 应力-应变曲线

图5为单调和疲劳荷载作用下UHPC(CA)试件

的应力-应变曲线,其中疲劳应力-应变曲线剔除了最后一个循环.由图5可知,随着循环次数的增加,UHPC(CA)的疲劳应力-应变曲线不断向变形增大的方向发展.与此同时,越接近疲劳破坏极限状态,曲线斜率越小,这反映了应变增长速率的增大和疲劳模量的衰减.现有研究表明^[8-9],纤维混凝土(FRC)的单调应力-应变曲线可作为其疲劳应力-应变曲线的包络线.由图5可见,该规律并不完全适用于UHPC(CA).在高应力水平($S \geq 0.8$)下,仍可通过静载变形来预估UHPC(CA)的疲劳破坏变形;而在低应力水平($S < 0.8$)下,通过静载变形预估的疲劳破坏变形比实际变形大.

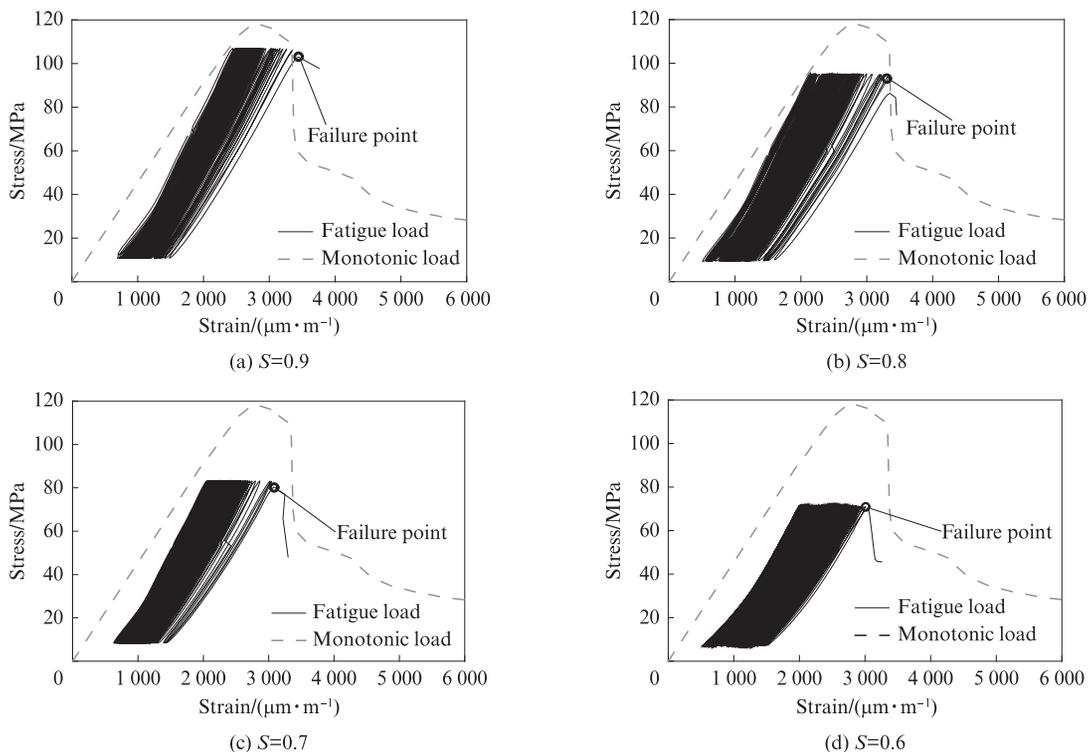


图5 单调和疲劳荷载作用下UHPC(CA)试件应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of UHPC(CA) under monotonic and fatigue loads

2.2.2 疲劳应变演化曲线

疲劳应变随循环比 n/N (n 为当前循环次数, N 为疲劳寿命)的变化曲线为疲劳应变演化曲线.利用疲劳应变演化曲线来表征疲劳荷载作用下UHPC(CA)试件的变形发展规律,见图6.由图6可见,与FRC类似,UHPC(CA)的疲劳变形发展呈现明显的三阶段特征.

2.3 基于疲劳应变演化曲线的疲劳破坏过程分析

将疲劳应变演化曲线(见图6)划分为3个阶段,以反映UHPC(CA)的疲劳破坏全过程,如图7所示.

(1)第I阶段——微裂纹萌生发展阶段(见图7

中A→B).此时初始微孔洞在疲劳荷载作用下开始发展.钢纤维与UHPC基体之间的界面最初是完整的,并在这一阶段结合在一起,但纤维增强效果不明显.通过UHPC(CA)的纳米压痕试验发现,粗骨料-基体界面过渡区是其力学性能薄弱环节^[7].因此,第I阶段中UHPC(CA)的变形发展不仅有初始微孔洞的扩展,还包含界面过渡区等内部薄弱环节微裂纹的出现.该阶段末,试件表面混凝土开始出现小面积脱落,见图8(a).

(2)第II阶段——微裂纹稳定发展与宏观裂缝萌生阶段(见图7中B→C).此时初始微孔洞和界面

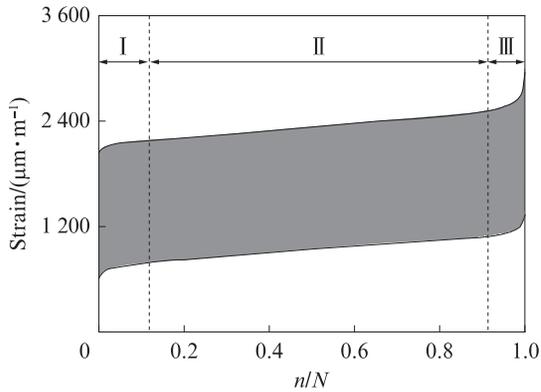


图6 典型的UHPC(CA)疲劳应变演化曲线
Fig. 6 Typical fatigue strain evolution curve of UHPC (CA)

过渡区的裂纹缓慢扩展,内部微裂纹穿过钢纤维,钢纤维开始发挥阻裂作用,主要表现为试件的应变以接近恒定的速率缓慢增长,伴随疲劳荷载的施加,试件表面继续脱落。第II阶段中后期,可以观察到试件中的宏观裂缝,见图8(b)。

(3)第III阶段——宏观裂缝发展阶段(见图7中C→D)。试件出现宏观裂缝后,钢纤维发挥了重要的桥接作用。随着越来越多的裂纹穿过纤维,钢纤维以化学黏结和摩擦的形式承受作用于断裂面上的疲劳荷载。对比图8(b)、(c)可以发现,试件疲劳破坏前,宏观裂缝并没有非常明显的发展,这表明钢纤维有效限制了宏观裂缝的发展。随后,试件迅速发生疲劳破坏。

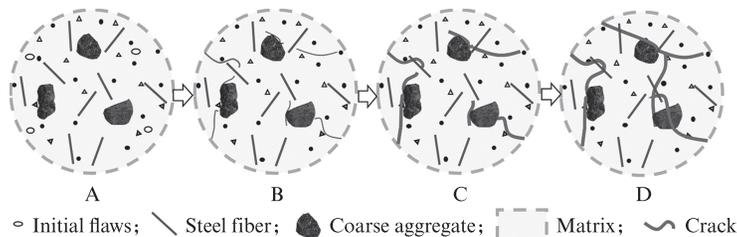


图7 UHPC(CA)的微观破坏过程
Fig. 7 Microscopic failure process of UHPC(CA)

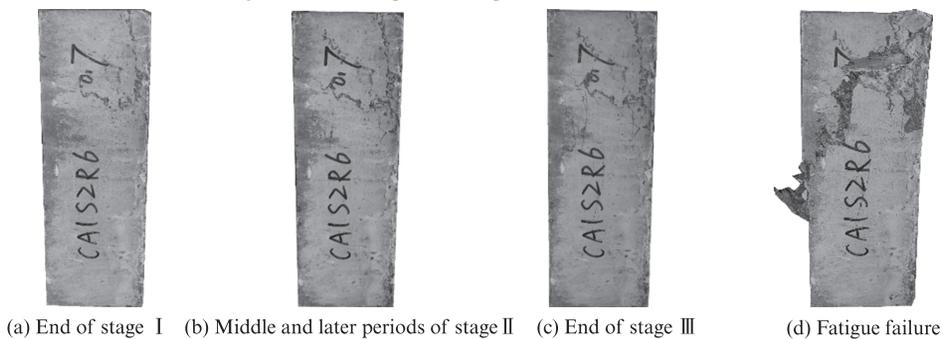


图8 UHPC(CA)的宏观破坏过程
Fig. 8 Macroscopic failure process of UHPC(CA)

2.4 疲劳方程及疲劳强度

2.4.1 疲劳寿命概率分布

现有研究中,通常利用Weibull分布理论来研究混凝土疲劳寿命^[5,10-11]。由于混凝土疲劳寿命离散性较大,为了保证疲劳寿命分布结果偏于安全可靠,本文采用双参数Weibull分布进行分析。

Weibull分布方程可简化为:

$$\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right) = b \ln N - b \ln N_a \quad (1)$$

式中: p 为存活率; N 为疲劳寿命; N_a 为特征寿命参数; b 为直线方程的斜率。

从式(1)可以看出, $\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)$ 与 $\ln N$ 呈线性关系。

令 $m = \ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)$, $n = \ln N$, $t = b \ln N_a$, 则式(1)可以

改写为:

$$m = bn - t \quad (2)$$

各应力水平下UHPC(CA)的疲劳寿命试验结果见表2(表中记有“*”的数字表示该试件在经受200万次疲劳荷载后仍未破坏,此时停止加载),其中存活率 p 的计算式为:

$$p = 1 - \frac{i}{k+1} \quad (3)$$

式中: i 为试件按疲劳寿命升序排列后的序号; k 为样本容量。

通过线性拟合获得UHPC(CA)在各应力水平下的 $\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)-\ln N$ 表达式,拟合曲线见图9。

表 2 疲劳寿命试验结果
Table 2 Test results of fatigue life

Specimen	S	N/times	ln(N/times)	p	$\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)$
CA-0.9-1	0.9	283	5.645	0.833	-1.700
CA-0.9-2		362	5.892	0.667	-0.904
CA-0.9-3		647	6.472	0.500	-0.367
CA-0.9-4		1 031	6.938	0.333	-0.095
CA-0.9-5		1 168	7.063	0.167	0.582
CA-0.8-1	0.8	3 215	8.076	0.833	-1.700
CA-0.8-2		6 227	8.737	0.667	-0.904
CA-0.8-3		6 797	8.824	0.500	-0.367
CA-0.8-4		8 185	9.010	0.333	0.095
CA-0.8-5		10 210	9.231	0.167	0.582
CA-0.7-1	0.7	25 511	10.147	0.833	-1.700
CA-0.7-2		58 742	10.981	0.667	-0.904
CA-0.7-3		88 145	11.387	0.500	-0.367
CA-0.7-4		100 870	11.522	0.333	0.095
CA-0.7-5		124 544	11.732	0.167	0.582
CA-0.6-1	0.6	648 876	13.383	0.800	-1.500
CA-0.6-2		874 599	13.682	0.600	-0.672
CA-0.6-3		1 391 565	14.146	0.400	-0.087
CA-0.6-4		1 648 749	14.316	0.200	0.476
CA-0.6-5		2 000 000*	14.509		
CA-0.5-1	0.5	2 000 000*	14.509		

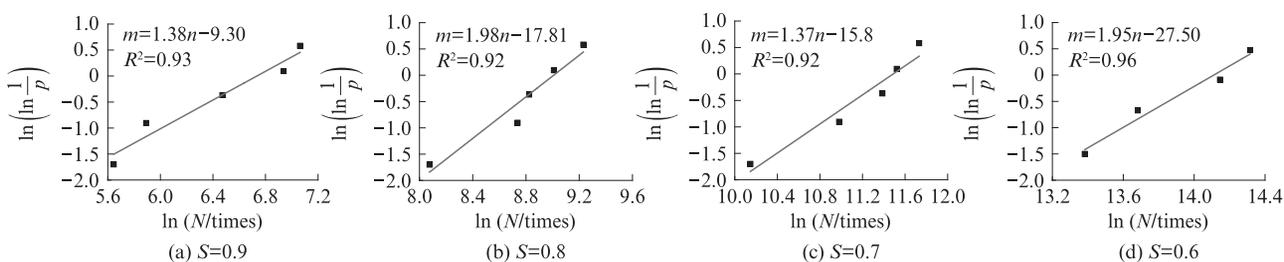


图 9 $\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)-\ln N$ 线性拟合曲线

Fig. 9 Linear fitting curves of $\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)-\ln N$

由图 9 可知,在各应力水平下, $\ln\left(\ln\frac{1}{p}\right)-\ln N$ 的线性关系均较好 (R^2 均大于 0.9), 说明 Weibull 分布可用于表征 UHPC(CA) 的单轴受压疲劳寿命. 根据线性拟合表达式, 求得各应力水平下疲劳寿命的 Weibull 分布参数 b 和 N_a , 结果见表 3.

表 3 UHPC(CA) 单轴受压疲劳寿命的 Weibull 分布参数
Table 3 Weibull distribution parameters of uniaxial compressive fatigue life of UHPC(CA)

Parameter	S=0.9	S=0.8	S=0.7	S=0.6
b	1.38	1.98	1.37	1.26
N_a /times	845	8 062	102 012	1 332 496

2.4.2 考虑存活率的 p -S-N 疲劳方程

UHPC 结构在疲劳设计时需考虑疲劳寿命和疲劳强度的离散性, 因此, 本节建立 UHPC(CA) 材料考虑存活率的 p -S-N 疲劳方程. 式 (4) 为 Weibull 分布的失效概率 (p') 方程.

$$p' = 1 - p = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{N}}{N_a}\right) \quad (4)$$

式中: \bar{N} 为对应失效概率的等效疲劳寿命.

基于 Weibull 分布参数可得各失效概率下 UHPC(CA) 的等效疲劳寿命. 将 UHPC(CA) 的等效疲劳寿命以双对数疲劳方程形式进行线性拟合, 即

可获得不同失效概率下的 $S-N$ 方程,进而求得 UHPC(CA) 的疲劳强度.式(5)为 UHPC(CA) 的 $p-S-N$ 疲劳方程.

将建立的 $p-S-N$ 疲劳方程绘制于图 10,可以发现本文受压疲劳寿命试验结果均落在 0.05~0.95 失效概率范围内.

$$\begin{cases} \lg S = 0.076\ 52 - 0.057\ 27 \lg N, (p' = 0.05) \\ \lg S = 0.112\ 09 - 0.055\ 21 \lg N, (p' = 0.50) \\ \lg S = 0.129\ 03 - 0.053\ 71 \lg N, (p' = 0.95) \end{cases} \quad (5)$$

2.4.3 疲劳强度

疲劳强度是指疲劳寿命 N 趋近无穷大时所施加的最大应力.混凝土材料的疲劳极限寿命通常取为 200 万次,由 $p-S-N$ 疲劳方程可求出不同失效

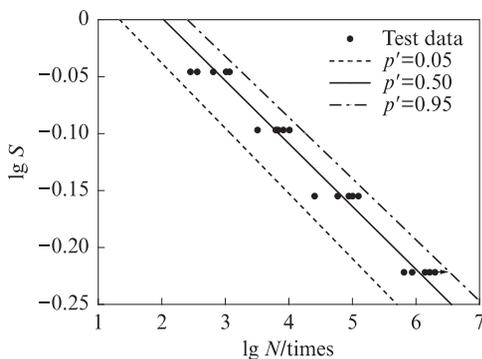


图 10 UHPC(CA)疲劳寿命与 $p-S-N$ 方程的关系
Fig. 10 Relationship between fatigue life and $p-S-N$ equation of UHPC(CA)

概率下 UHPC(CA) 疲劳强度对应的应力水平 S_f , 见表 4.

表 4 不同失效概率下 UHPC(CA) 疲劳强度对应的应力水平 S_f
Table 4 Stress level S_f corresponding to fatigue strength of UHPC(CA) under different failure probabilities

p'	UHPC(CA) $f_{cu}=135.4\text{ MPa}$	Plain concrete ^[12] $f_{cu}=37.5\text{ MPa}$	High strength concrete ^[13] $f_{cu}=84.7\text{ MPa}$
0.05	0.520		
0.50	0.581	0.693	0.654
0.95	0.617		

由表 4 可见,随着混凝土抗压强度的增大,其疲劳强度对应的应力水平 S_f 呈现减小的趋势. UHPC(CA) 棱柱体试件的抗压强度为 118.8 MPa,失效概率为 0.05 时,200 万次疲劳寿命对应的应力水平为 0.520,则具有 95% 存活率的 UHPC(CA) 疲劳强度为 61.78 MPa(118.8×0.520).

3 结论

(1)UHPC(CA)的疲劳破坏形态为剪切破坏.与 RPC 不同,粗骨料的掺入使 UHPC(CA) 试件破坏时呈现 1 条或 2 条主裂缝,其典型破坏断面分为疲劳区和裂纹扩展区,其中疲劳区有明显的反复摩擦痕迹.

(2)疲劳荷载作用下,UHPC(CA)的变形发展呈现明显的三阶段特征,即微裂纹萌生发展阶段、微裂纹稳定发展和宏观裂缝萌生阶段、宏观裂缝发展阶段.

(3)在高应力水平($S \geq 0.8$)下,UHPC(CA)的单调应力-应变曲线可以作为其疲劳应力-应变曲线的包络线,可用静载变形来预估疲劳破坏变形;在低应力水平($S < 0.8$)下,用静载变形预估的疲劳破坏变形比实际变形大.

(4)UHPC(CA)的单轴受压疲劳寿命服从 Weibull 分布.基于疲劳试验结果,建立了 UHPC(CA)

考虑存活率的 $p-S-N$ 双对数疲劳方程,得出 UHPC(CA) 具有 95% 存活率的疲劳强度为 61.78 MPa,对应的应力水平为 0.520.

参考文献:

[1] 王晓飞,王阳平. 钢纤维活性粉末混凝土力学特性[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(6):941-945.
WANG Xiaofei, WANG Yangping. Mechanical properties of RPC with different steel fiber volume contents[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(6):941-945.(in Chinese)

[2] WU F H, XU L H, CHI Y, et al. Compressive and flexural properties of ultra-high performance fiber-reinforced cementitious composite: The effect of coarse aggregate [J]. Composite Structures, 2020, 236:111810.

[3] DENG F Q, XU L Q, CHI Y, et al. Effect of steel-polypropylene hybrid fiber and coarse aggregate inclusion on the stress-strain behavior of ultra-high performance concrete under uniaxial compression[J]. Composite Structures, 2020, 252:112685.

[4] 程俊,刘加平,刘建忠,等. 含粗骨料超高性能混凝土力学性能研究及机理分析[J]. 材料导报, 2017, 31(12):115-119, 131.
CHENG Jun, LIU Jiaping, LIU Jianzhong, et al. An experimental study and a mechanism analysis on mechanical properties of ultra-high performance concrete with coarse aggregate [J]. Materials Review, 2017, 31(12):115-119, 131.(in Chinese)

[5] 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):37-42.
- YU Ziruo, AN Mingzhe, YAN Guiping. Experimental research on the fatigue performance of reactive powder concrete[J]. China Railway Science, 2008(4):37-42. (in Chinese)
- [6] 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. Fatigue properties of reactive powder concrete with different steel fiber ratios[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2011, 38(6):6-12.(in Chinese)
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] OTTER D E, NAAMAN A E. Properties of steel fiber reinforced concrete under cyclic load[J]. ACI Materials Journal, 1988, 85(4):254-261.
- [9] CACHIM P B, FIGUEIRAS J A, PEREIRA P A A. Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression[J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(2):211-217.
- [10] 刘问, 徐世娘, 李庆华. 等幅疲劳荷载作用下超高韧性水泥基复合材料弯曲疲劳寿命试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(1):119-127.
- LIU Wen, XU Shilang, LI Qinghua. Study on flexural fatigue life of ultra- high toughness cementitious composites under constant amplitude cyclic loading[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(1):119-127. (in Chinese)
- [11] 李庆华, 黄博滔, 周宝民, 等. 超高韧性水泥基复合材料单轴压缩疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(1):135-142.
- LI Qinghua, HUANG Botao, ZHOU Baomin, et al. Study on compression fatigue properties of ultra high toughness cementitious composites[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(1):135-142.(in Chinese)
- [12] 王瑞敏, 赵国藩, 宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(4):38-47.
- WANG Ruimin, ZHAO Guofan, SONG Yupu. Compression fatigue properties of concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(4):38-47. (in Chinese)
- [13] 吴佩刚, 赵光仪, 白利明. 高强混凝土抗压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1994, 27(3):33-40.
- WU Peigang, ZHAO Guangyi, BAI Liming. Compression fatigue properties of high strength concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 27(3):33-40. (in Chinese)