文章编号:1007-9629(2023)07-0755-07

钢-聚丙烯混杂纤维混凝土等幅受压疲劳变形

崔 凯, 徐礼华*, 池 寅

(武汉大学土木建筑工程学院,湖北武汉 430072)

摘要:对钢-聚丙烯混杂纤维混凝土(HFRC)开展单轴等幅循环受压疲劳变形试验,以探究应力水平 对HFRC疲劳破坏形态、疲劳应力-应变曲线、疲劳耗能能力以及极限疲劳变形的影响规律.结果表 明:HFRC的疲劳破坏形态为剪切破坏,具有延性破坏特征;HFRC的疲劳累积耗能和极限疲劳变形 随着应力水平的降低而增加;建立了考虑存活率的HFRC应力水平-极限疲劳变形方程,能够定量 描述HFRC在任意疲劳荷载作用下的极限变形.

关键词:钢-聚丙烯混杂纤维;等幅循环受压;疲劳变形;应力水平-极限疲劳变形方程 中图分类号:TU528.572 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.008

Fatigue Deformation of Steel-Polypropylene Hybrid Fiber Reinforced Concrete under Constant-Amplitude Cyclic Compression

CUI Kai, XU Lihua^{*}, CHI Yin

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

Abstract: Steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete(HFRC) were tested for uniaxial constant-amplitude cyclic compression to investigate their fatigue deformation behaviors, with an emphasis on the effects of the stress level on fatigue failure mode, fatigue stress-strain curve, fatigue cumulative energy dissipation and ultimate fatigue deformation of HFRC. The results show that the fatigue failure mode of HFRC presents a shear failure and has ductile characteristics. In addition, cumulative energy dissipation and ultimate fatigue failure of the HFRC specimen increase with a decrease in stress level. Finally, a stress level- ultimate fatigue deformation equation is proposed to quantitively describe the ultimate deformation of concrete under an arbitrary fatigue loading.

Key words : steel-polypropylene hybrid fiber; constant-amplitude cyclic compression; fatigue deformation; stress level-ultimate fatigue deformation equation

纤维混凝土作为新生代复合材料,已经逐步成 为土木工程中应用广泛的材料之一.其中,钢-聚丙 烯混杂纤维混凝土(HFRC)以其优异的综合性能备 受关注^[1-5].在纤维混凝土结构长期服役过程中,频繁 的重复荷载作用导致其力学性能不断退化,最终在 低于静载承载力的情况下发生疲劳破坏.因此,研究 纤维混凝土材料的疲劳性能,对纤维混凝土结构的 设计具有十分重要的意义. 近几十年来,国内外学者针对纤维混凝土的疲劳行为开展了系统的试验研究,取得了比较丰富的研究成果^[6-8].其中,钢纤维(SF)混凝土的研究成果最多,钢纤维的掺入能够延缓宏观裂缝的萌生和发展,显著提升混凝土的疲劳性能^[9-11].聚丙烯纤维(PPF) 混凝土的研究结果表明^[12-14],由于聚丙烯纤维出色的 微裂纹桥接能力,将其掺入混凝土中能够提高混凝 土的疲劳强度.

收稿日期:2022-09-02;修订日期:2022-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878519,51978538);湖北省重点研发计划项目(2020BAB060);湖北省自然科学基金资助项目 (2020CFB639)

第一作者:崔 凯(1991—),男,江苏盐城人,武汉大学博士生.E-mail: kaicui@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: xulihua@whu.edu.cn

目前,关于HFRC的研究成果主要集中在弯曲 疲劳性能方面^[15-16].然而,HFRC材料的单轴受压疲劳 性能对其在海洋采油平台、桥梁等混凝土结构中的应 用至关重要,单一纤维混凝土的疲劳性能研究成果和 HFRC的弯曲疲劳性能研究成果还不能直接应用于 这些场合.为此,本文重点研究HFRC材料在受压疲 劳荷载下的变形行为.通过受压疲劳试验研究应力水 平对破坏形态、应力-应变曲线、累积耗能以及极限变 形的影响规律,建立包含存活率(P)的极限疲劳变形计 算方法,以期为HFRC结构的抗疲劳设计提供参考.

1 试验

1.1 试件设计

参考课题组前期研究成果^[14,17]选取最优掺量:钢 纤维体积分数为1.50%,长径比为60;聚丙烯纤维体 积分数为0.15%,长径比为167.疲劳试验均采用尺 寸为100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试件.制 作HFRC的主要材料为:42.5级普通硅酸盐水泥、优 质河砂(细度模数为2.7)、碎石(粒径5~20 mm)、高 效减水剂(减水率(质量分数)约为20%)、钢纤维和 聚丙烯纤维.设计混凝土的水灰比(*m*_w/*m*_c,质量比) 为0.36,强度等级为C50,并根据JGJ55—2011《普通 混凝土配合比设计规程》和CECS 38: 2004《纤维混 凝土结构技术规程》中的相关内容进行配合比设计, 结果如表1所示.钢纤维和聚丙烯纤维的主要物理参 数如表2所示.

表1 混凝土的配合比 Table 1 Mix proportion of concrete

					kg/m ³					
Cement	Sand	Sand Gravel		Water	Water reducer					
486.00	746.00	1 038.	038.00 175.00		3.89					
表 2 钢纤维与聚丙烯纤维的主要物理参数 Table 2 Main physical parameters of steel fiber and polypropylene fiber										
Туре	Dian n	neter/ . nm	Aspect ratio	Density/ (g•cm ⁻³)	Tensile strength/MPa					
SF	SF 0.500		60	7.80	Around 500					
PPF	0.	048	167	0.91	400-450					

将静载破坏视为应力水平(S)为1.0的疲劳破坏,为了研究HFRC在高周和低周疲劳工况下的性能,本文还设计3个应力水平(S为0.9、0.8、0.7).考虑到疲劳试验的离散性较大,每组制作6个平行试件,共24个HFRC棱柱体试件,其中6个为静载试验试件,18个为疲劳试验试件.浇筑试件时,同批次制作6个边长为150 mm的立方体试件.脱模后,将所有试

件放置在(20±3)℃、相对湿度95%的标准养护室内 养护28 d.

1.2 加载方案

HFRC的单轴循环受压疲劳试验在MTS-311.41 型 2 500 kN 电液伺服动态疲劳试验机上进行.数据 采集由伺服控制器 FlexTest[™]60 以及系统软件 Multipurpose Elite完成,包括荷载、位移以及循环次 数等.在加载之前,将试件放在机器的几何中心,确 保试件与试验机作动器之间达到对中.按照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法》,测试 立方体试件的28 d抗压强度,加载速率为0.6 MPa/s, 得到HFRC立方体抗压强度的平均值为64.30 MPa.

为了尽可能消除龄期对 HFRC 疲劳性能的影响,将所有棱柱体试件在室内环境中放置 90 d 后,在 电液伺服动态疲劳试验机上进行单轴受压静载试验,采用位移控制,加载速率为 0.005 mm/s,测得 HFRC轴心抗压强度的平均值为 50.62 MPa.

疲劳试验采用荷载控制,正弦波加载,加载频率 为8Hz,疲劳试验的应力比为0.1.HFRC考虑存活率 的不同应力水平下的极限疲劳变形(Δ)见表3,其中 静载破坏的极限疲劳变形为静载峰值变形(Δ₀).此 外,工程上通常采用的存活率经验公式为:*P*=1-*i*/ (*m*+1),其中*i*为同一应力水平下极限疲劳变形升序 排列之后的序号,*m*为样本容量.

2 结果与分析

2.1 纤维增强机理

图1为混杂纤维多尺度桥接效应示意图.由图 1可见:在疲劳加载早期,聚丙烯纤维对基体中的 微裂纹起到了显著的桥接作用;随着加载次数的增 加,由于聚丙烯纤维的强度和刚度较低,其桥接效 率逐渐减弱,钢纤维开始发挥作用,抑制宏观裂缝 的扩展;随后,宏观裂缝在疲劳荷载的作用下进一 步扩展并汇集,逐渐形成临界裂缝,聚丙烯纤维此 时几乎完全失去桥接效应,钢纤维起主导作用;随 着主裂缝处的钢纤维逐渐被拔出,试件最终发生疲 劳破坏.

图 2 为 HFRC 的破坏形态.由图 2 可见,HFRC 的静载破坏和疲劳破坏皆表现为单一主裂纹的剪切破坏,应力水平对 HFRC 破坏形态的影响不明显. HFRC 在疲劳加载的过程中,其表面只有少许小块 混凝土剥落,发生疲劳破坏时仍具有较好的整体性, 呈现出延性破坏特征.这一现象也表明钢-聚丙烯混 杂纤维多层次、多尺度和逐级阻裂的效应,能够显著 提高混凝土的抗裂能力和变形能力.除了多尺度裂

表 3 HFRC 在不同应力水平下的极限疲劳变形											
Table 3 Ultimate fatigue deformations of HFRC under various stress levels											
S	No.	$\Delta/{ m mm}$	P	S	No.	Δ/mm	Р				
1.0	1	0.5866	0.8571		1	0.8511	0.8571				
	2	0.6193	0.714 3	0.8	2	0.8771	0.7143				
	3	0.6295	0.5714		3	0.8976	0.5714				
	4	0.6342	0.4286		4	0.9022	0.4286				
	5	0.6394	0.2857		5	0.9262	0.2857				
	6	0.6582	0.1429		6	0.9752	0.1429				
0.9	1	0.7403	0.8571	0.7	1	1.0334	0.8571				
	2	0.7689	0.714 3		2	1.0779	0.7143				
	3	0.7881	0.5714		3	1.1123	0.5714				
	4	0.8086	0.4286		4	1.1698	0.4286				
	5	0.8221	0.2857		5	1.1834	0.2857				
	6	0.8317	0.1429		6	1.2323	0.1429				



Fig. 1 Schematic diagram of hybrid fiber bridging effect

缝桥接效应,混杂纤维的滑移、拔出、断裂以及与基体之间的摩擦(见图3),也显著增加了混凝土的耗能能力.

2.2 疲劳应力-应变曲线

图 4 为典型的 HFRC 疲劳应力-应变曲线.由图 4 可见:随着疲劳荷载的持续和塑性应变的增加,疲



图 2 HFRC 的破坏形态 Fig. 2 Failure modes of HFRC

劳应力-应变曲线逐渐偏离单调曲线,不断向变形增 大的方向发展;接近疲劳变形极限时,疲劳应力-应 变曲线的斜率减小,HFRC的刚度退化,曲线变得稀



图 3 HFRC 破坏断面中纤维的 SEM 图像 Fig. 3 SEM images of fibers in the broken sections of HFRC

疏,变形速率增大;当曲线开始偏离而无法闭合时, 发生疲劳破坏,疲劳加载终止;随着应力水平的减 小,疲劳应力-应变曲线偏离单调曲线的距离增大, 即疲劳曲线从"高细"型逐渐转变为"矮宽"型.



滞回耗能被认为是表征循环荷载作用下混凝土 疲劳性能的一个关键指标.可以用滞回曲线的面积 表征混凝土在疲劳荷载作用下的能量耗散(E)^[18].图 5为HFRC在不同应力水平下的能量耗散比,其中E₁ 为应力水平为0.9时HFRC的能量耗散.由图5可 见,HFRC的能量耗散能力随着应力水平的减小而 增大.



图 5 HFRC 在不同应力水平下的能量耗散比 Fig. 5 Energy dissipation ratios of HFRC under various stress levels

2.3 疲劳变形演化曲线

图 6为 HFRC 疲劳变形随循环比的变化过程,图 中 n/N为循环比,n为当前循环次数,N为疲劳寿命. 图 6(a)为 HFPC 的三阶段疲劳变形演化曲线.根据 裂纹演化模式和变形增长速率的变化,HFPC 的疲劳 受压变形全过程可分为3个阶段:阶段 I 的变形速率 较快,基体内部的微裂纹开始萌生,部分微裂纹开始 扩展,此阶段占疲劳寿命的5%~10%;阶段 II 的变 形速率缓慢,宏观裂缝逐渐形成,与初始微裂纹共同 发展,此阶段占疲劳寿命的80%~90%;阶段 II 的变 形速率再次加快,宏观裂缝进一步扩展并汇集,临界 裂缝逐渐形成,此阶段占据疲劳寿命的5%~10%. 总体来说,混凝土的三阶段曲线呈拉长的S型.

为了全面评估 HFRC 的疲劳变形能力,同时尽量减少离散性对结果的影响,取6个平行试件的平均 值作为判断标准.以混凝土材料受压变形规律为基础,选取12个特征点的数据,即循环比分别为0.05、0.10、0.15、0.20、0.40、0.60、0.80、0.85、0.90、0.95、0.995、1.00,获得 HFPC 的平均疲劳变形曲线,如图6(b)所示.由图6(b)可见:

(1)在不同应力水平下,HFRC的疲劳变形演化 曲线总体相差不大,仅在最后阶段有较大差别.应力 水平越小,HFRC的极限疲劳变形越大(极限疲劳变 形为疲劳破坏点对应的变形),如图7所示.

(2)应力水平对HFRC极限疲劳变形的影响可能与纤维的滑移量有关.当HFRC接近疲劳破坏时,由于广泛开裂和膨胀,钢纤维处于完全被激活的状态.随着裂纹的不断扩展,主裂缝处的钢纤维不断被拔出.此处可以借鉴钢纤维拔出的全过程^[19].在这种情况下,较低的应力水平意味着更小的拉拔力,这有助于增加钢纤维的滑移量,如图8 所示.因此,随着应力水平的降低,HFRC的极限疲劳变形增大.

2.4 极限疲劳变形的概率模型

由表3可知,每组HFRC的极限疲劳变形结果较 为分散,因此引入概率模型分析HFRC极限疲劳变 形的可靠性.Huang等^[20]发现纤维混凝土在不同应力 水平下的极限疲劳变形遵循双参数威布尔分布.由 此,本文尝试采用威布尔分布模型分析应力水平对 HFRC极限疲劳变形的影响.首先,需要检验在不同 应力水平下的极限疲劳变形是否符合威布尔分布. 其次,使用指数函数描述极限疲劳应变和应力水平



(a) Three-stage fatigue deformation evolution curve

图6 HFRC疲劳变形随循环比的变化过程

Fig. 6 Fatigue deformation evolution curves of HFRC with ratios of load cycles







Fig. 8 Schematic diagram of pull-out behavior of steel fibers embedded in concrete^[19]

之间的关系.最后,提出考虑存活率的应力水平-极 限疲劳变形(P-S-Δ)方程,即HFRC极限疲劳变形概 率模型.

双参数威布尔分布的概率密度函数 f(x) 如图 9 所示,其函数形式为:

$$f(x) = (a/b)(x/b)^{a-1} \exp\left[-(x/b)^a\right] \quad (1)$$



式中:x为极限疲劳变形;a为形状参数;b为尺度参 数.mm.

由图9可知,存活率为:

$$P = \int_{\Delta}^{\infty} f(x) \, \mathrm{d}x = \exp\left[-\left(\Delta/b\right)^{a}\right] \qquad (2)$$

对式(2)两边取2次对数,可得:

$$\ln\left[\ln\left(1/P\right)\right] = a\ln\Delta - a\lnb \tag{3}$$

由式(3)可知, $\ln \Delta$ 和 ln $\left[\ln (1/P) \right]$ 具有线性 关系.

图 10为HFRC 在各应力水平下 $\ln \Delta - \ln [\ln (1/P)]$ 的拟合直线.由图10可见,相关系数(R²)均大于0.9, 表明HFRC的极限疲劳变形呈双参数威布尔分布的 假设成立.

各应力水平下的威布尔分布参数见表4.

由表3可知,极限疲劳变形随着应力水平的增加 而减小.基于这一现象,假设 $\lim \Delta = \Delta_0$,可用如式 (4)所示的指数函数形式描述极限疲劳变形与应力 水平之间的关系^[20],如图11所示:

$$\Delta = \Delta_0^{p(1-S)+1} \exp\left[q(1-S)\right] \tag{4}$$

式中:p、q为通过试验数据拟合得到的参数.

由图11可见,式(4)在图11中呈现出很好的拟合 结果,其中p=-0.648,q=1.663.图11中选取的点为

表4 HFRC极限疲劳变形的威布尔分布参数

 Table 4
 Weibull distribution parameters of ultimate fatigue deformation of HFRC

Fig. 11 Relationship between ultimate fatigue deformation and stress level

各应力水平下存活率为0.5000对应的极限疲劳变 形值.

根据式(3),静载峰值变形的威布尔分布如式 (5)所示:

$$P = \exp\left[-\left(\Delta_0/b_0\right)^{a_0}\right] \tag{5}$$

式中: a_0 和 b_0 分别为 Δ_0 的形状参数和尺度参数.

由表4可知, a_0 =23.106, b_0 =0.6404 mm.将式 (4)代入式(5),可得如式(6)所示的P-S- Δ 模型:

$$\Delta = b_0^{p(1-S)+1} \exp[q(1-S)] (-\ln P)^{[p(1-S)+1]/a_0}$$
(6)

为了验证*P-S-*Δ模型的可靠性,需要将此模型得出的解析结果和本文试验数据进行比较(见图12). 由图12可知,两者结果较为吻合.因此,本文认为 *P-S-*Δ模型可以在一定程度上描述不同应力水平下

Fig. 12 Comparisons between model predictions and test results

HFRC极限疲劳变形的概率分布情况.

3 结论

(1)钢-聚丙烯混杂纤维具有多层次、多尺度和 逐级阻裂的特点;HFRC的受压疲劳破坏形态和静 载破坏形态类似,皆表现为剪切破坏,呈现出延性破 坏特征.

(2)HFRC的受压疲劳变形演化曲线受应力水 平的影响较小,仅在最后阶段有较大差别;其极限疲 劳变形和能量耗散能力随应力水平减小而增大.

(3)HFRC的受压极限疲劳变形符合双参数威 布尔分布;基于疲劳试验数据,建立了*P-S-*Δ方程,能 够定量描述HFRC在任意受压疲劳荷载作用下的极 限变形,可为HFRC结构的抗疲劳设计提供参考.

参考文献:

- [1] 徐礼华,梅国栋,黄乐,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土轴心受拉应力-应变关系研究[J].土木工程学报,2014,47(7):35-45.
 XU Lihua, MEI Guodong, HUANG Le, et al. Study on uniaxial tensile stress-strain relationship of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2014,47(7):35-45. (in Chinese)
- [2] DENG F Q, XU L H, 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.
- [3] 王龙,池寅,徐礼华,等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能尺 寸效应[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):781-788.
 WANG Long, CHI Yin, XU Lihua, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):781-788. (in Chinese)
- [4] 徐礼华,李彪,池寅,等.钢-聚丙烯混杂纤维混凝土单轴循环受 压应力-应变关系研究[J].建筑结构学报,2018,39(4):140-152.
 XU Lihua, LI Biao, CHI Yin, et al. Experimental investigation on stress-strain relation of steel-polypropylene hybrid fiber

reinforced concrete subjected to uniaxial cyclic compression[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(4): 140-152. (in Chinese)

- [5] 吴涛,杨雪,刘喜.钢-聚丙烯混杂纤维自密实轻骨料混凝土性 能[J].建筑材料学报,2021,24(2):268-275.
 WU Tao, YANG Xue, LIU Xi. Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with hybrid steel and polypropylene fibers[J]. Journal of Building Materials, 2021,24 (2):268-275. (in Chinese)
- [6] LIQH, HUANGBT, XUSL, et al. Compressive fatigue damage and failure mechanism of fiber reinforced cementitious material with high ductility[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 90:174-183.
- [7] 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 behavior of ultra-high performance concrete with coarse aggregate under uniaxial cyclic compression[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):381-388. (in Chinese)
- [8] 寇佳亮,赵坤龙,张浩博.高延性纤维混凝土拉压疲劳性能试验 研究[J]. 土木工程学报. 2018, 51(9):17-25.
 KOU Jialiang, ZHAO Kunlong, ZHANG Haobo. Experimental study on tension and compression fatigue properties of high ductile fiber concrete[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(9): 17-25. (in Chinese)
- [9] GOEL S, SINGH S P. Fatigue performance of plain and steel fibre reinforced self compacting concrete using S-N relationship
 [J]. Engineering Structures, 2014, 74:65-73.
- [10] POVEDA E, RUIZ G, CIFUENTES H, et al. Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 101:9-17.
- [11] PARVEZ A, FOSTER S J. Fatigue of steel-fibre-reinforced concrete prestressed railway sleepers[J]. Engineering Structures, 2017, 141:241-250.

- [12] MA Y H, GU J Y, LI Y, et al. The bending fatigue performance of cement-stabilized aggregate reinforced with polypropylene filament fiber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 230-236.
- [13] SUN Z Z, XU Q W. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 527(1/2):198-204.
- [14] CUI K, XU L H, LI X F, et al. Fatigue life analysis of polypropylene fiber reinforced concrete under axial constant-amplitude cyclic compression [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319:128610.
- [15] 邹尤.混杂纤维混凝土弯曲疲劳特性研究[D].武汉:武汉理工 大学,2010.
 ZOU You. Study on flexural fatigue performance of hybrid fiber reinforced concrete [D]. Wunhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [16] BAJAJ V, SINGH S P, SINGH A P, et al. Flexural fatigue analysis of hybrid fibre-reinforced concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 2012, 64(4):361-373.
- [17] HUANG L, XU L H, CHI Y, et al. Bond strength of deformed bar embedded in steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 218: 176-192.
- [18] DONG S F, WANG Y L, ASHOUR A, et al. Uniaxial compressive fatigue behavior of ultra-high performance concrete reinforced with super-fine stainless wires[J]. International Journal of Fatigue, 2021, 142:105959.
- [19] DENG F Q, DING X X, CHI Y, et al. The pull-out behavior of straight and hooked-end steel fiber from hybrid fiber reinforced cementitious composite: Experimental study and analytical modelling[J]. Composite Structures, 2018, 206:693-712.
- [20] HUANG B T, LI Q H, XU S L, et al. Fatigue deformation behavior and fiber failure mechanism of ultra-high toughness cementitious composites in compression [J]. Materials and Design, 2018, 157:457-468.