

引用本文:周金枝,吴学,钟楚珩,等.玄武岩纤维再生混凝土循环加载变形与疲劳寿命预测[J].建筑科学与工程学报,2023,40(6):1-9.
ZHOU Jinzhi, WU Xue, ZHONG Chuheng, et al. Cyclic loading deformation and fatigue life prediction of basalt fiber recycled aggregate concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(6): 1-9.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05088

玄武岩纤维再生混凝土循环加载变形与疲劳寿命预测

周金枝^{1,2}, 吴学^{1,3}, 钟楚珩¹, 田鹏¹, 余智玲¹

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 桥梁结构健康与安全国家重点实验室, 湖北 武汉 430034; 3. 中建三局集团(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:为改善再生混凝土(RAC)的疲劳性能,掺入玄武岩纤维制成玄武岩纤维增强再生混凝土(BFRAC),对不同纤维体积率的BFRAC弯曲疲劳性能进行研究,分析了BFRAC的疲劳变形规律,并采用响应面法(RSM)研究了纤维体积率和应力水平对其疲劳寿命的影响。结果表明:BF-RAC的疲劳应变和疲劳模量都呈三阶段发展;随着应力水平和循环比的增大,疲劳应变逐渐增大,疲劳模量逐渐减小;随着纤维体积率的增大,疲劳应变和疲劳模量发展减缓,其中纤维体积率为0.3%时效果最佳;在相同应力水平下RAC疲劳寿命低于天然混凝土(NAC),玄武岩纤维的掺入可显著提高RAC疲劳寿命,随着纤维体积率的增大,BFRAC疲劳寿命呈现先增大后减小的趋势;通过RSM建立的BFRAC疲劳寿命预测模型经检验证明具有良好精度;纤维体积率和应力水平的交互作用对BFRAC疲劳寿命有一定影响,但应力水平的大小对BFRAC疲劳寿命的影响更为显著;采用渴求函数对BFRAC进行多目标优化得出在0.6、0.7、0.8应力水平下的最优纤维掺量分别为0.321%、0.317%、0.313%。

关键词:玄武岩纤维再生混凝土;疲劳损伤;刚度退化;响应面法;疲劳寿命预测

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)06-0001-09

Cyclic loading deformation and fatigue life prediction of basalt fiber recycled aggregate concrete

ZHOU Jinzhi^{1,2}, WU Xue^{1,3}, ZHONG Chuheng¹, TIAN Peng¹, YU Zhiling¹

(1. College of Civil Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Structure Health and Safety, Wuhan 430034, Hubei, China; 3. China Construction Third Engineering Bureau Group (Shenzhen) Co., Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: In order to improve the fatigue performance of recycled aggregate concrete (RAC), basalt fiber was incorporated to make basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete (BFRAC). The bending fatigue performance of BFRAC with different fiber volume fractions was investigated, then the fatigue deformation law of BFRAC was analyzed, and the effect of fiber volume fraction and stress level on its fatigue life was studied by response surface methodology (RSM). The results show that the fatigue strain and fatigue modulus of BFRAC develop in three stages. With the increase of stress level and cycle ratio, the fatigue strain gradually increases and

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 桥梁结构健康与安全国家重点实验室开放课题(BHSL19-04-KF); 湖北省教研项目(2017314)

作者简介: 周金枝(1965-), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: hgzhongzhou@126.com.

通信作者: 钟楚珩(1989-), 男, 工学博士, 讲师, E-mail: chuheng.zhong@hbut.edu.cn.

the fatigue modulus gradually decreases. With the increase of fiber volume fraction, the development of fatigue strain and fatigue modulus slows down, and the effect is the best when the fiber volume fraction is 0.3 %. The fatigue life of RAC is lower than that of normal aggregate concrete (NAC) at the same stress level, and the incorporation of basalt fibers can significantly improve the fatigue life of RAC, with the increase of fiber volume fraction, BFRAC fatigue life shows a trend of increasing first and then decreasing. The fatigue life prediction model of BFRAC established by RSM is tested and proved to have good accuracy. The interaction of fiber volume fraction and stress level has some effect on BFRAC fatigue life, but the magnitude of stress level has more significant effect on BFRAC fatigue life. The multi-objective optimization of BFRAC using the desirability function shows that optimal fiber volume fraction is 0.321%, 0.317%, and 0.313% at 0.6, 0.7, and 0.8 stress levels, respectively.

Key words: basalt fiber recycled aggregate concrete; fatigue damage; rigidity degeneration; response surface methodology; fatigue life prediction

0 引言

再生混凝土(RAC)技术是实现建筑垃圾循环再利用的主要途径,受到了国内外众多学者的关注,并得到了广泛研究。普遍研究认为,再生骨料的自身缺陷使再生混凝土的基本力学性能^[1-2]、耐久性^[3-4]和疲劳性能^[5-6]都低于天然混凝土(NAC)。玄武岩纤维因具有抗腐蚀性好、抗拉强度高、电绝缘和耐高温等优点而被广泛应用于增强 RAC 性能。Liu 等^[7]研究了玄武岩纤维掺量对再生粗骨料取代率为 100%的 RAC 力学性能的影响,结果表明,当纤维体积率为 0.2%时,RAC 力学性能增强效果最佳。刘逸等^[8]对不同玄武岩纤维体积掺量的玄武岩纤维增强再生混凝土(BFRAC)进行了轴心受拉试验,结果表明,BFRAC 的轴拉强度、峰值应变和初始弹性模量随着纤维掺量的增加均呈现先增大后减小的趋势。魏康等^[9]基于电通量试验发现,将适量的玄武岩纤维掺入 RAC,能显著改善其抗氯离子渗透性能。解国梁等^[10]开展了不同纤维体积分数的 BFRAC 冻融循环试验,结果表明,玄武岩纤维的掺入能改善 RAC 的抗冻性,并在纤维掺量为 1.2 kg·m⁻³时效果最佳。Dong 等^[11]采用 SEM 对 BFRAC 的微观结构进行研究,结果表明,玄武岩纤维与水泥材料具有良好的相容性,并改善了 RAC 界面过渡区的性能。高银等^[12]通过试验研究发现,玄武岩纤维增强了 RAC 的延性,使得 RAC 的劈拉强度得到显著提高。Wang 等^[13]对高温后 BFRAC 的性能进行研究,结果表明,玄武岩纤维有助于改善 RAC 的高温性能。

综上所述,疲劳性能研究对 BFRAC 应用于桥

梁结构及路面具有重要的现实意义,而目前对 BFRAC 的疲劳性能研究较少。因此,本文开展了不同玄武岩纤维体积率的 BFRAC 弯曲疲劳试验,探究玄武岩纤维掺量对 RAC 弯曲疲劳性能的影响,并通过响应面法(RSM)建立疲劳寿命预测模型,为工程实际应用提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试验原材料及配合比

采用华新牌 P.O42.5 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰;天然粗骨料为石灰岩碎石,再生粗骨料由原始强度为 C35 的废弃混凝土制成,二者粒径均为 5~20 mm 连续级配,粗骨料的物理参数见表 1。细骨料为天然河砂,细度模数为 2.65;玄武岩纤维长度为 20 mm,具体指标见表 2。外加剂为聚羧酸高效减水剂,减水率为 25%。

表 1 粗骨料性质

Table 1 Properties of coarse aggregate					
骨料类型	表观密度/ (kg·m ⁻³)	堆积密度/ (kg·m ⁻³)	压碎指 标/%	吸水 率/%	含泥 量/%
天然骨料	2 695	1 340	3.92	0.92	0.43
再生骨料	2 669	1 250	11.00	3.60	0.40

表 2 玄武岩纤维性能指标

Table 2 Performance index of basalt fiber				
单丝直径/ μm	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模量/ GPa	拉伸模量/ MPa	断裂伸长 率/%
10~15	2 650	80	3 500	2.7

制样过程中,为保证玄武岩纤维在 RAC 内部均匀分布,采用干拌法进行拌制。首先将胶凝材料、粗骨料、细骨料和玄武岩纤维混合均匀拌制 2 min,

再将水与减水剂混合后加入混合物搅拌 2 min。待搅拌均匀后进行坍落度测试,经测试各组混凝土坍落度均在 180~200 mm 之间,表明各组混凝土均具有良好的和易性,能满足实际工程需求。

NAC 配合比设计目标为 C50,其余 4 组以 NAC 为基准进行设计;再生骨料在 RAC 中的取代率为 30%,以等质量进行取代;玄武岩纤维按体积率掺入混合物,有 0.2%、0.3%、0.4% 三种体积率,

编号分别为 BFRAC-1、BFRAC-2、BFRAC-3,配合比设计如表 3 所示。试验中使用 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件进行抗压试验,每组 3 块;使用 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体试件进行四点弯曲试验和弯曲疲劳试验,每组 3 根用于测定抗折强度,15 根进行弯曲疲劳试验。试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)^[14]进行。

表 3 混凝土配合比及基本力学性能

Table 3 Mix proportion and basic mechanical properties of concrete

试件编号	各材料用量/(kg·m ⁻³)								抗压强度/	抗折强度/
	水泥	粉煤灰	天然粗骨料	再生粗骨料	中砂	水	减水剂	玄武岩纤维	MPa	MPa
NAC	320	80	1 095	0	700	160	1.75	0.00	57.20	5.50
RAC	320	80	766	329	700	160	1.75	0.00	52.95	5.03
BFRAC-1	320	80	766	329	700	160	1.75	5.30	55.35	5.43
BFRAC-2	320	80	766	329	700	160	1.75	7.95	54.20	6.12
BFRAC-3	320	80	766	329	700	160	1.75	10.60	53.95	5.76

1.2 疲劳试验

疲劳试验采用 MTS 动态疲劳试验机,四点弯曲加载,试验设备和加载形式如图 1 所示。试验设定 3 个应力水平(0.6、0.7、0.8),加载频率为 10 Hz,以恒幅正弦荷载的形式施加疲劳荷载,为等应力加载,应力比为 0.1。应力比为最大疲劳应力与最小疲劳应力的比值。试件应变利用动静态应变仪实时采集,采样频率为 50 Hz,电阻应变片粘贴在试件下底面。

2 BFRAC 力学性能分析

由表 3 可知,随着玄武岩纤维的掺入,RAC 的抗压强度有小幅提升,纤维体积率为 0.2%时,BFRAC 提升最大,较 RAC 提升了 4.5%;BFRAC 的抗折强度较抗压强度提升更为明显一些,纤维体积率为 0.3%,BFRAC 较 RAC 提升了 21.7%。主要原因是在抗折试验中 RAC 要承受部分的拉应力,掺入的玄武岩纤维在 RAC 内部呈网状结构,能够承担额外的拉应力,从而使 RAC 的抗折强度得到提升;但在抗压试验中 RAC 承担的是压应力,且玄武岩纤维为柔性纤维,故而对抗压强度的提高十分有限。

3 BFRAC 疲劳损伤特性

3.1 应变发展规律

混凝土的疲劳应变不仅反映了混凝土疲劳破坏发展的程度,还是分析混凝土疲劳累积损伤机理的重要依据。图 2 为 BFRAC 疲劳变形后最大疲劳应变随循环比的变化曲线,其中 ϵ 为应变。由图 2 可知,BFRAC 的疲劳损伤过程主要包含 3 个主要阶段:第一阶段为微裂纹的萌生阶段,应变随着循环比的轻微变化而逐渐增大;第二阶段为裂纹的扩展阶段,应变以相对恒定速率上升;第三阶段为宏观裂纹的产生阶段,应变急剧上升到最终失效点。当应力水平一定时,随着循环比的增大应变逐渐增大,在相同的循环比下 RAC 的应变大于 NAC,说明 RAC

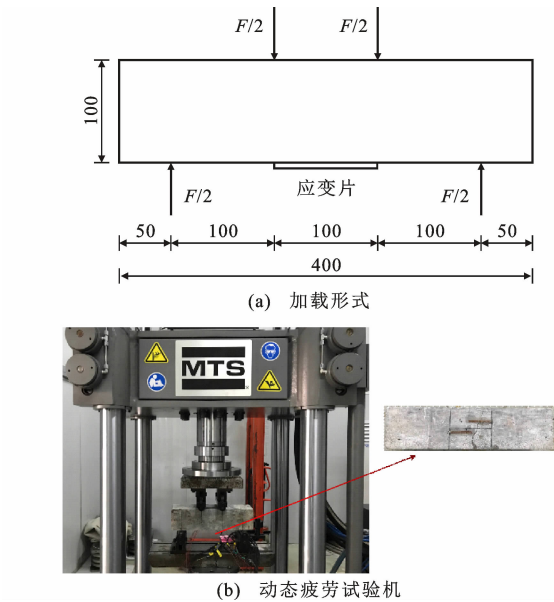


图 1 疲劳加载试验(单位:mm)
Fig. 1 Fatigue loading test (unit:mm)

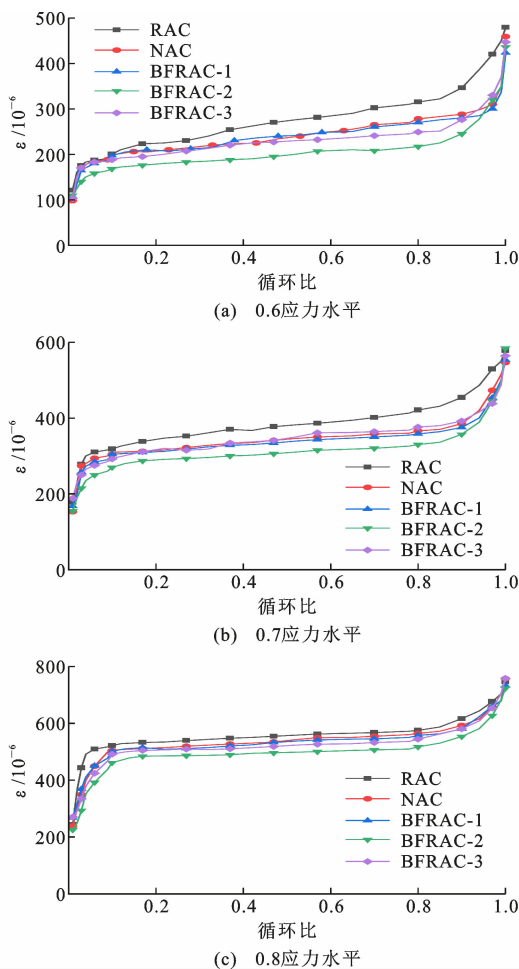


图2 不同应力水平下的最大疲劳应变变化曲线

Fig. 2 Change curve of maximum fatigue strain under different stress levels

的疲劳损伤更为严重。这是由于再生骨料疏松多孔,孔隙率较高,骨料表面易形成富水层,导致界面过渡区薄弱,降低了RAC的疲劳性能。不过随着玄武岩纤维的掺入,RAC的疲劳性能得到改善,当应力水平一定且循环比相同时,BFRAC的应变不仅小于RAC,而且小于NAC。这主要归因于纤维的桥接效应,穿插在水泥基体之间的玄武岩纤维将应力从基体传递至自身,承担了额外的应力,使裂纹的发展受到限制,导致应变速率降低。但纤维也不是越多越好,当纤维体积率超过0.3%时,BFRAC的应变开始上升。这是由于纤维体积率过高会导致纤维的缠结团聚,阻隔了水泥基体之间互相黏结,使RAC内部产生大量孔洞,从而影响了RAC疲劳性能。此外,对于所有混合物,高应力水平下的应变大于低应力水平下的应变,表明高应力水平下的疲劳损伤更严重。

图3为混凝土在不同阶段的循环比所占百分

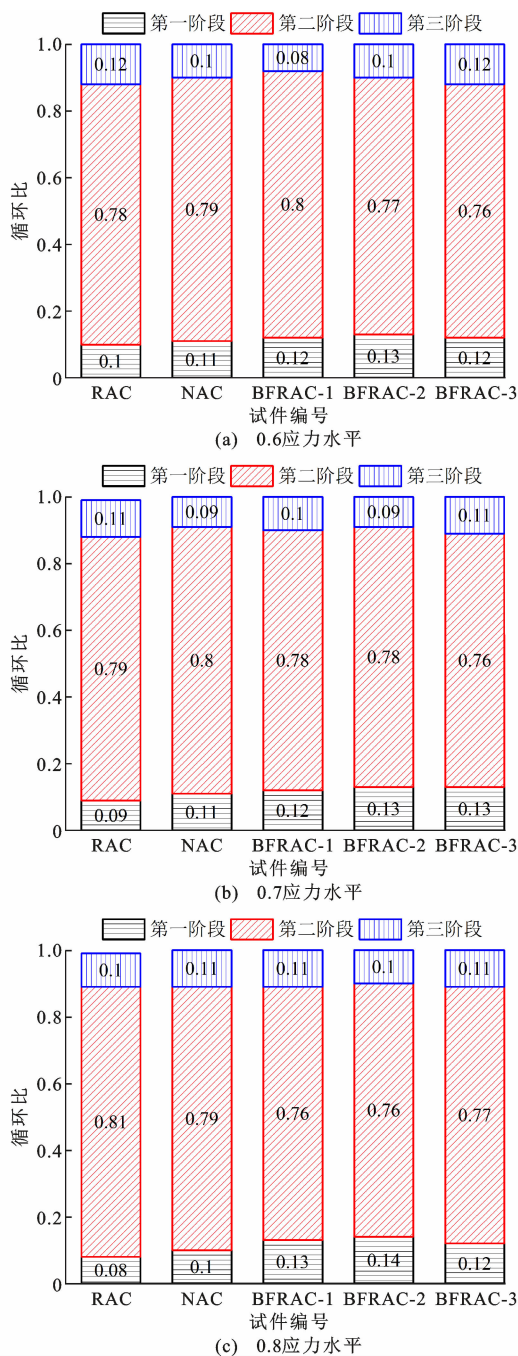


图3 各组混凝土在不同阶段的循环比所占百分比

Fig. 3 Percentage of cycle ratio of each group of concrete in different stages

比。由图3可知,与未掺入玄武岩纤维的混凝土不同,BFRAC在第一阶段结束时的循环比通常比较大,说明纤维的掺入延长了疲劳损伤的第一阶段。这是因为疲劳加载过程中大部分能量被玄武岩纤维在裂化区通过应力传递机制^[15-16]所吸收,使得疲劳损伤延迟,从而导致第一阶段疲劳损伤的持续时间延长,然而在第二阶段和第三阶段中纤维失去效力,在这2个阶段中BFRAC循环比占比与RAC、NAC

无明显差异。

3.2 刚度退化规律

刚度退化可用于评估混凝土路面和其他结构的剩余寿命,从而制定和采用相应的维护策略。混凝土疲劳模量是反映刚度变化的指标之一,其疲劳模量 E_s 定义为

$$E_s = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为最大循环荷载; σ_{\min} 为最小循环荷载; ϵ_{\max} 为最大疲劳应变; ϵ_{\min} 为疲劳残余应变。

根据式(1)绘制出疲劳模量随循环比变化曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,随着疲劳加载的进行,疲劳模量的变化规律类似于应变增长规律,其衰减过程也分为 3 个阶段:快速衰减阶段、稳定衰减阶段和迅速破坏阶段。BFRAC 在弯曲疲劳荷载作用下逐渐失效,使得其疲劳模量不断降低。综合分析可知,影响 BFRAC 疲劳模量的主要因素有:循环加载次数、应力水平和纤维体积率。随着循环加载次数、应力水平的增加,BFRAC 疲劳模量逐渐减小。随着纤维体积率的增大,BFRAC 疲劳模量衰减速率减缓,说明玄武岩纤维能有效增强 RAC 的疲劳性能。

BFRAC 疲劳模量变化规律的第二阶段占据整个疲劳过程的 80% 左右,而且呈现出明显的线性变化。因此,对 BFRAC 疲劳模量变化曲线第二阶段的数据进行线性拟合,并采用微损法对 BFRAC 疲劳寿命 N 进行预测。设该阶段的表达式为

$$E_s = E_0 - kN \quad (2)$$

式中: E_0 为初始弹性模量; k 为刚度衰减系数。

将破坏弹性模量与初始弹性模量的比值定义为临界损伤变量,其表达式为

$$D_f = \frac{E_f}{E_0} \quad (3)$$

式中: E_f 为破坏疲劳模量; D_f 为临界疲劳损伤。

根据 Miner 线性累积损伤理论^[17-18],得到 BFRAC 的疲劳损伤变量 D 为

$$D = 1 - \frac{E_s}{E_0} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)得

$$N = \frac{DE_0}{k} \quad (5)$$

因篇幅所限,取 0.6 应力水平下的各组试验数据代入以上步骤,得到的分析结果如表 4 所示。由表 4 可知,未掺入玄武岩纤维的混凝土的 k 值和 D_f 值均大于 BFRAC,其中 k 值越大,表明其疲劳损伤和劣化的速度更快,而 D_f 值越大,表明其韧性越差,

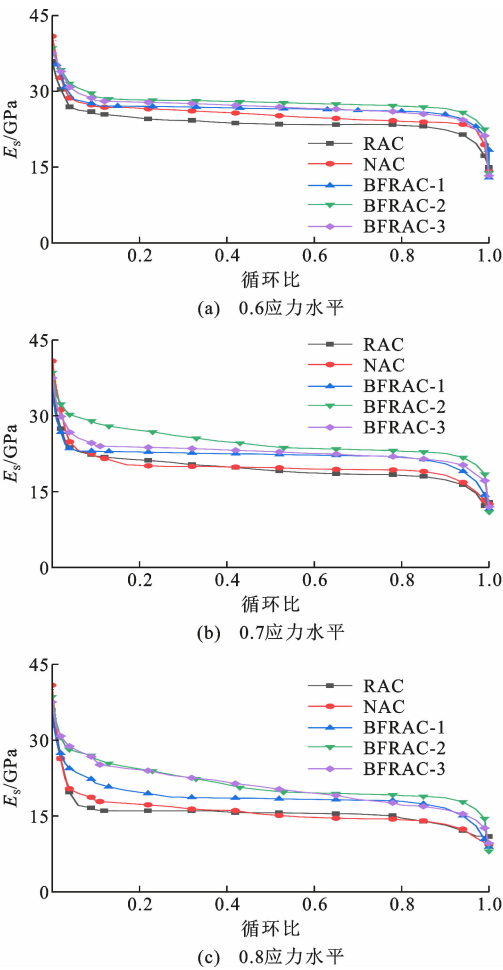


图 4 不同应力水平下的疲劳模量变化曲线

Fig. 4 Change curve of fatigue modulus under different stress levels

表 4 0.6 应力水平下各组试验数据分析结果

Table 4 Test data analysis results of each group at 0.6 stress level

试件编号	疲劳寿命	E_0 /GPa	E_f /GPa	D_f	k	预测疲劳寿命
RAC	210 177	35.91	14.88	0.41	0.048 7	305 544
NAC	350 371	40.85	15.73	0.39	0.045 6	344 956
BFRAC-1	321 584	35.31	12.87	0.36	0.039 4	326 650
BFRAC-2	791 729	38.54	13.27	0.34	0.015 1	876 159
BFRAC-3	536 370	37.52	13.83	0.37	0.021 7	637 327

即抵抗变形能力弱。不同组试件的预测疲劳寿命与实测疲劳寿命存在一定差距,但仍在可接受范围内,可为工程实际应用提供一定的参考价值。

4 疲劳寿命预测

4.1 疲劳寿命分析

图 5 给出了不同类型的混凝土疲劳寿命均值。由图 5 可知,随着应力水平的增大,混凝土疲劳寿命

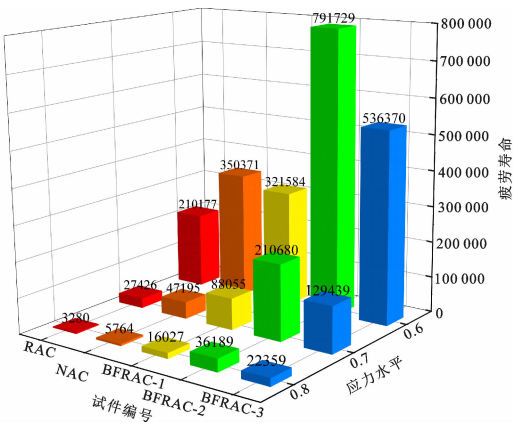


图5 不同类型的混凝土疲劳寿命均值

Fig. 5 Mean fatigue life of different types of concrete

逐渐降低,这是由于较高的应力水平会加快裂纹扩展速率,从而在混凝土内部出现更多的累积裂缝,最终加速混凝土失效破坏。在相同应力水平下 RAC 疲劳寿命低于 NAC,当应力水平为 0.6 时,RAC 疲劳寿命较 NAC 下降了 40.01%。RAC 疲劳寿命下降是因为掺入再生骨料在 RAC 基体中形成更多的初始缺陷,所以导致 RAC 疲劳寿命降低。不过随着玄武岩纤维的掺入,RAC 疲劳寿命得到提高,除 BFRAC-1 之外,其余的 BFRAC 疲劳寿命均高于 NAC。当纤维体积率为 0.3% 时,BFRAC-2 的疲劳寿命提升最大,在应力水平为 0.6 时,RAC 的疲劳寿命为 BFRAC-2 的 26.55%,说明玄武岩纤维有效增大了 RAC 的疲劳寿命。玄武岩纤维也减小了应力水平对疲劳寿命的影响,各试验组应力水平每增大 0.1,未掺入玄武岩纤维的 NAC 和 RAC 疲劳寿命相比前一应力水平的疲劳寿命折减大约 90%,而掺入玄武岩纤维的 RAC 疲劳寿命折减 70%~85%。这是因为与普通混凝土不同,BFRAC 中的玄武岩纤维增大了水泥基体之间的黏结力,所以有效延缓了 BFRAC 试件的裂缝发展。

4.2 RSM-CCD 试验设计与数据分析

响应面法(RSM)是数学与统计学相结合的方法,它不仅反映了各种因素对响应指标的影响,而且还通过 3D 图像反映了各种因素之间相互作用对响应指标的影响。目前 RSM 在评估混凝土力学性能方面的可行性已经得到充分验证^[19-20],但在混凝土疲劳寿命方向的运用还比较少。

采用 Design-Expert 软件中的 CCD 模块对 BFRAC 疲劳寿命进行分析,建立两因素三水平回归预测模型,并探究纤维体积率、应力水平及二者的交互作用对 BFRAC 疲劳寿命的影响。试验选取纤维体

积率和应力水平二者为影响因素,分别用 A、B 表示。选择混凝土疲劳寿命 lg(N)值作为响应值。响应面影响因素与水平设计见表 5,RSM 试验分析结果见表 6。

表 5 响应面因素及水平设计

Table 5 Response surface factors and level design

水平	影响因素		编码因素	
	A/%	B		
低	0.2	0.6	-1	-1
0	0.3	0.7	0	0
高	0.4	0.8	1	1

表 6 RSM 试验分析结果

Table 6 RSM test analysis results

序号	影响因素		lg(N)	lg(N')
	A/%	B		
1	0.2	0.6	5.507 3	5.516 7
2	0.4	0.6	5.729 5	5.733 5
3	0.2	0.8	4.204 9	4.214 7
4	0.4	0.8	4.349 5	4.353 9
5	0.2	0.7	4.944 8	4.938 3
6	0.4	0.7	5.112 1	5.116 3
7	0.3	0.6	5.898 6	5.897 8
8	0.3	0.8	4.558 6	4.557 0
9	0.3	0.3	5.011 1	5.300 0
10	0.3	0.3	5.230 2	5.300 0
11	0.3	0.3	5.505 2	5.300 0
12	0.3	0.3	5.398 3	5.300 0
13	0.3	0.3	5.323 6	5.300 0

注:N'为疲劳寿命预测值。

4.3 RSM-CCD 预测模型建立

根据上面建立的模型,并考虑所有的一次项、二次项和交互项,得到响应方程为

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j \quad (6)$$

式中:Y 为响应预测值; β_0 为常数项; β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 分别为一次项、二次项、交互回归系数; x_i 、 x_j 为自变量;n 为影响因素的数量,此模型取 2。

疲劳寿命的二次回归预测模型拟合公式为

$$Y = 5.3 + 0.089A - 0.6704B - 0.0194AB - 0.2727A^2 - 0.0726B^2 \quad R^2 = 0.96 \quad (7)$$

疲劳寿命模型方差分析结果见表 7。由表 7 可知:该模型的 F 值为 30.26,P 值输出结果小于 0.000 1,表明模型有极高的显著性和有效性;失拟项 F 值对应的 P 值为 0.999 8,大于 0.05,表明所得模型的可靠性较高,拟合度良好;决定系数 R^2 为 0.96,表明响应预测值与实测值之间具有良好的相

关性。

4.4 模型应用与分析

疲劳寿命的三维响应曲面及对应的等高线如图 6、7 所示。由图 6 可知,当纤维体积率固定时,随着应力水平的增大,疲劳寿命逐渐下降,且当纤维体积率为 0.3 % 时,疲劳寿命下降速度加快,响应面变

表 7 疲劳寿命模型方差分析结果

Table 7 Variance analysis results of fatigue life model			
项目	F 值	P 值	统计显著性
模型	30.36	0.000 1	显著
A	2.37	0.168 0	
B	134.14	< 0.000 1	
AB	0.074 9	0.792 2	
A ²	10.22	0.015 1	
B ²	0.724 1	0.423 0	
失拟项	0.002 4	0.999 8	不显著

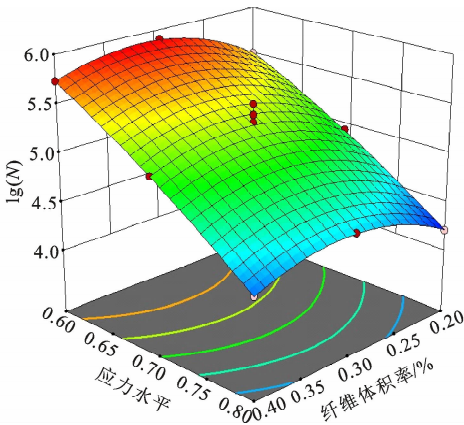


图 6 三维响应面图

Fig. 6 3D response surface diagram

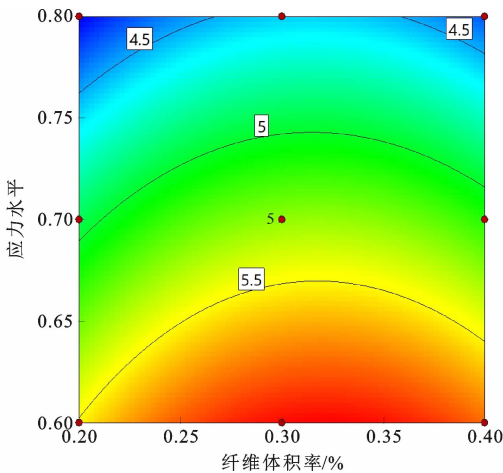


图 7 疲劳寿命等高线图

Fig. 7 Contour map of fatigue life

陡。图 7 所示的疲劳寿命等高线间距逐渐变宽也反映了这一趋势,沿着应力水平方向的趋势较陡,沿着

纤维体积率方向的趋势较缓。以上分析表明,纤维体积率和应力水平的交互作用对 BFRAC 疲劳寿命有一定影响,但应力水平的大小对 BFRAC 疲劳寿命的影响更为显著。

在 RSM 模型的基础上,采用渴求函数^[21]对 BFRAC 进行多目标优化,寻找不同应力水平下的最优纤维掺量以实现 BFRAC 疲劳寿命的最大化。定义单个响应的渴求值 $d_i, d_i \in [0, 1]$ 。当响应值靠近期望时, $d_i = 1$; 当响应值远离期望时, $d_i = 0$ 。渴求值最大化和最小化算法公式见式(8)、(9)。渴求函数 D 为各响应渴求值的幂指数乘积,见式(10)。通过多重目标优化,得到综合考虑不同因素后的最佳参数组合。不同参数优化目标与限制条件见表 8。

$$d_i(Y_i)_{\max} = \begin{cases} 0 & Y_i < L_i \\ \left(\frac{Y_i - L_i}{U_i - L_i}\right)^{r_i} & L_i \leq Y_i \leq U_i \\ 1 & Y_i > U_i \end{cases} \quad (8)$$

$$d_i(Y_i)_{\max} = \begin{cases} 0 & Y_i < L_i \\ \left(\frac{Y_i - L_i}{U_i - L_i}\right)^{r_i} & L_i \leq Y_i \leq T_i \\ 1 & Y_i > T_i \end{cases} \quad (9)$$

$$D = \left[\prod_i (d_i(y_i)) \omega_i \right]^{\frac{1}{\sum \omega_i}} \quad (10)$$

式中: L_i, U_i, T_i 分别为第 i 个响应的上限、下限和最佳值; r 为调形函数; ω_i 为第 i 个响应的权重。

表 8 BFRAC 优化设计目标定义

Table 8 BFRAC optimization design objective definition

因素	优化目标	上限	下限
A/%	一定区域内	0.4	0.2
B	等于	0.6、0.7、0.8	
lg(N)	最大值	6	4

在一定的限制条件下,渴求函数在测试区域内是连续的并且仅具有一个峰值,意味着多目标优化具有实际意义。在进行配比优化设计过程中,可以通过在影响因素水平区域内选择响应值的最大值,进而求解目标模型的综合最优值。在综合考量疲劳寿命的最大值后,得出 0.6、0.7、0.8 应力水平下的最优纤维掺量分别为 0.321%、0.317%、0.313%。上述分析中,基于 RSM 建立了 BFRAC 疲劳寿命预测模型,并通过求解渴求函数获取不同应力水平下 BFRAC 的最优掺量,这对 BFRAC 日后应用在路面及桥梁等项目具有重要意义。

5 结 语

(1) 掺入适量的玄武岩纤维能显著提高 RAC

的抗折强度,但对 RAC 抗压强度的提高作用十分有限。

(2)BFRAC 的疲劳损伤过程包含 3 个主要阶段:微裂纹的萌生阶段、裂纹的扩展阶段、宏观裂纹的产生阶段。随着循环比的增大,应变逐渐增大,且在相同的循环比下 RAC 的应变大于 NAC,不过随着玄武岩纤维的掺入,RAC 的疲劳性能得到改善;当应力水平一定且循环比相同时,BFRAC 的应变不仅小于 RAC,而且小于 NAC,但纤维体积率超过 0.3%后,增强效果有所下降。

(3)BFRAC 疲劳模量的变化规律类似于应变增长规律,即其衰减过程也分为 3 个阶段:快速衰减阶段、稳定衰减阶段和迅速破坏阶段。随着循环加载次数、应力水平的增加,BFRAC 的疲劳模量逐渐减小,不过随着纤维体积率的增大,BFRAC 疲劳模量衰减速率减缓,说明玄武岩纤维能有效增强 RAC 疲劳性能。

(4)再生骨料的掺入会降低混凝土疲劳寿命,而玄武岩纤维的掺入可显著提高 RAC 疲劳寿命;随着纤维体积率的增大,BFRAC 疲劳寿命呈现先增大后减小的趋势,当纤维含量为 0.3%时,BFRAC-2 疲劳寿命最大。

(5)通过 RSM 分析可知:纤维体积率和应力水平的交互作用对 BFRAC 疲劳寿命有一定影响,但应力水平的大小对 BFRAC 疲劳寿命的影响更为显著;RSM 多目标优化以疲劳寿命为响应目标进行最优化时,得出在 0.6、0.7、0.8 应力水平下的最优纤维掺量分别为 0.321%、0.317%、0.313%。

参考文献:

References:

- [1] 丁发兴,方常靖,龚永智,等.再生混凝土单轴力学性能指标统一计算方法[J].建筑科学与工程学报,2014,31(4):16-22.
DING Faxing, FANG Changjing, GONG Yongzhi, et al. Unified calculation method of uniaxial mechanical performance index of recycled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 16-22.
- [2] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: an overview[J]. Materials and Structures, 2006, 39(6): 655-664.
- [3] 耿欧,孙倩,李大贺.氯盐对再生混凝土硫酸盐侵蚀的抑制作用研究[J].建筑科学与工程学报,2020,37(6):108-116.

- GENG Ou, SUN Qian, LI Dahe. Study on inhibitory effect of chlorine salt on sulfate corrosion of recycled concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 108-116.
- [4] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A, et al. Durability of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1054-1065.
- [5] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A, et al. Fatigue limit of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 146-154.
- [6] 肖建清,丁德馨,骆行文,等.再生混凝土疲劳损伤演化的定量描述[J].中南大学学报(自然科学版),2011,42(1):170-176.
XIAO Jianqing, DING Dexin, LUO Xingwen, et al. Quantitative analysis of damage evolution as recycled concrete approaches fatigue failure[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(1): 170-176.
- [7] LIU H X, YANG J W, KONG X Q, et al. Basic mechanical properties of basalt fiber reinforced recycled aggregate concrete[J]. The Open Civil Engineering Journal, 2017, 11(1): 43-53.
- [8] 刘逸,刘元珍,刘运房,等.玄武岩纤维对再生混凝土轴心受拉性能的影响[J].科学技术与工程,2021,21(12):5060-5065.
LIU Yi, LIU Yuanzhen, LIU Yunfang, et al. Effect of basalt fiber on uniaxial tensile properties of recycled aggregate concrete[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(12): 5060-5065.
- [9] 魏康,李犇,孙峤.玄武岩纤维改善再生混凝土抗氯离子渗透性能研究[J].硅酸盐通报,2022,41(5):1656-1662.
WEI Kang, LI Ben, SUN Qiao. Improving chloride ion penetration resistance of recycled concrete by basalt fiber[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(5): 1656-1662.
- [10] 解国梁,申向东,刘金云,等.玄武岩纤维再生混凝土抗冻性能及损伤劣化模型[J].复合材料科学与工程,2021(4):55-60.
XIE Guoliang, SHEN Xiangdong, LIU Jinyun, et al. Frost resistance and damage degradation model of basalt fiber regenerated concrete[J]. Composites Science and Engineering, 2021(4): 55-60.
- [11] DONG J F, WANG Q Y, GUAN Z W. Material properties of basalt fibre reinforced concrete made with recycled earthquake waste[J]. Construction and Building Materials, 2017, 130: 241-251.
- [12] 高银,宗翔.玄武岩纤维对再生混凝土基本力学

- 性能的影响[J]. 长江大学学报(自科版), 2018, 15(21):6-10,4.
- GAO Yin,ZONG Xiang. The effect of basalt fiber on the basical mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2018, 15(21):6-10,4.
- [13] WANG Y G, LI S P, HUGHES P, et al. Mechanical properties and microstructure of basalt fibre and nano-silica reinforced recycled concrete after exposure to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247:118561.
- [14] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003.
- Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [15] LEE M K, BARR B I G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(4):299-305.
- [16] 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.
- [17] 薛彦卿,丁 锋,陈峰林,等. 路用水泥混凝土疲劳损伤的可靠度分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(6):1009-1014.
- XUE Yanqing, DING Feng, CHEN Fenglin, et al. Fatigue damage reliability analysis of cement concrete for highway pavement[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(6):1009-1014.
- [18] BROUTMAN L J, SAHU S. A new theory to predict cumulative fatigue damage in fiberglass reinforced plastics [M]//CORTEN H. Composite Materials: Testing and Design. West Conshohocken: ASTM International, 1972:170.
- [19] 朱志远,岑国平,董宗戈,等. 基于 RSM 的混凝土抗冻性研究[J]. 混凝土, 2010(5):13-15.
- ZHU Zhiyuan, CEN Guoping, DONG Zongge, et al. Study on freeze-thaw resistance of concrete based on RSM[J]. Concrete, 2010(5):13-15.
- [20] LI Q X, CAI L C, FU Y W, et al. Fracture properties and response surface methodology model of alkali-slag concrete under freeze-thaw cycles [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:620-626.
- [21] ALGIN Z, OZEN M. The properties of chopped basalt fibre reinforced self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186:678-685.