

# 钢筋活性粉末混凝土梁的疲劳性能试验研究

罗许国, 刘岱鑫

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 通过对 2 根具有相同截面和配筋率的钢筋活性粉末混凝土梁的静力和等幅疲劳试验, 研究了以出现概率为 98.11% 的桥梁应力幅值作用下, 钢筋活性粉末混凝土梁裂缝、跨中挠度、受压区边缘 RPC 应变和钢筋应变随疲劳加载次数的变化规律。试验结果表明, 采用出现概率为 98.11% 的桥梁应力幅值进行疲劳加载时, 钢筋活性粉末混凝土梁的疲劳寿命达 200 万次以上。其裂缝宽度、跨中挠度、受压区边缘 RPC 应变以及钢筋应变均随着疲劳加载次数的增加均呈现出 2 阶段发展规律, 且 200 万次疲劳加载结束时的测量值分别为 0.12mm、0.438mm、1 010  $\mu\epsilon$  和 987  $\mu\epsilon$ , 远小于静载破坏时的相应值, 钢筋活性粉末混凝土梁体现出较好的耐疲劳性能。

**关键词:** 高强度钢筋; 活性粉末混凝土梁; 静力试验; 疲劳试验; 疲劳性能

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0484-05

## Research on the fatigue performance of reinforced reactive powered concrete beam

LUO Xuguo, LIU Daixin

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Based on the static and fatigue tests of two reinforced reactive powered concrete beams, crack, mid-span deflection, strains of concrete in compressive zone and strains of steel bars of the reinforced reactive powered concrete beams changed with the fatigue loading times were studied under bridges stress amplitude with occurrence probability of 98.11%. Test results showed that the fatigue life of reinforced reactive powered concrete beams reached up to  $200 \times 10^4$ . The crack width, mid-span deflection, strain of concrete in compressive zone and strains of steel bars had the laws of two stage development, and when fatigue tests were over, the value of them were 0.12mm, 6.438mm, 1010 $\mu\epsilon$  and 987 $\mu\epsilon$  less than the results of static test, showing best anti-fatigue performance.

**Key words:** high strength reinforcement ;reactive powered concrete beams; static test; fatigue test; fatigue property

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 以下简称 RPC) 由于其具有超高的强度、高韧性和高耐久性等特点<sup>[1-2]</sup>, 自 20 世纪 90 年代问世以来, 国内外研究人员对其在土木工程领域的应用开展了大量的研究工作且多集中在静力性能方面<sup>[3-5]</sup>。然而, 对于土木工程中的一些常见领域, 如吊车梁、海洋平台以及公路和铁路桥梁等, 都不可避免的面临着疲劳荷载的作用。疲劳荷载的作用会导致结构材料的性能不断退化。最终在低于静载强度的情况下发生脆性破坏<sup>[6]</sup>。因而, 为了实现 RPC 材料的推广应用, 了解钢筋 RPC 结构的疲劳性能非常重要。笔者通过钢筋 RPC 梁的静力和疲劳试验, 研究了钢筋 RPC 梁在疲劳荷载作用下的性能劣化过程。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

整个试验共设计、制作了 2 根具有相同截面和配筋率的钢筋 RPC 梁, 试验梁采用受弯控制, 依据文献<sup>[4]</sup>进行配筋, 截面实际配筋率为 3.3 %, 符合规范对适筋梁的要求。同时, 在试件剪弯段内配置足够数量的箍筋防止试件发生斜截面破坏。钢筋 RPC 梁的实际外形尺寸和配筋情况如图 1-2 所示。试验梁的制作采用现场人工搅拌成型的方法, 成型 2 d 后拆模, 在室内环境下洒水养护。所有试验梁中, 1 根进行静载试验, 用于确定疲劳加载荷载水平的参考值。另外 1 根进行疲劳试验。

收稿日期: 2015-07-06 修改稿日期: 2016-07-30

基金项目: 湖南省教育厅项目(14A048) 和湖南省自然科学基金(14JJ7056)资助

作者简介: 罗许国(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事桥梁结构疲劳性能研究。E-mail: luodakai2003@aliyun.com.

通讯作者: 刘岱鑫(1991-), 男, 硕士生, 主要从事桥梁疲劳性能研究

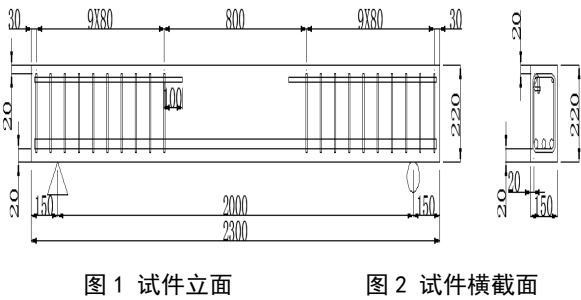


图 1 试件立面 Fig.1 Facade of specimen 图 2 试件横截面 Fig. 2 Cross-section of specimen

1. 2 试验原材料

混凝土采用湖南大学研制的 RPC, 其基本配合比如表 1 所示. 每个试验梁在浇筑期间分别制作 3 个尺寸为 100 mm ×100 mm ×100 mm 的试块, 用于测定钢筋 RPC 梁在试验时的 RPC 强度值. 棱柱体试块尺寸为 100 mm ×100 mm ×300 mm, 总计 6 个, 用于测定正式试验时 RPC 棱柱体的抗压强度和弹性模量. 试块采用与试验梁相同的制作和养护方法. 由于我国目前还没有制定针对 RPC 这种高强材料的力学性能试验规程, 因而暂参考普通混凝土力学性能试验方法进行. RPC 材料的试验结果见表 2.

表 1 RPC 配合比

Tab. 1 Proportions of RPC mix (kg/m<sup>3</sup>)

水泥	硅灰	细砂	高效减水剂	钢纤维	水
770	193	1078	19	77	193

表 2 RPC 实测力学性能

Tab. 2 Measured value of RPC mechanical property

试验梁 编号	立方体抗压 强度 $f_c$ /MPa	棱柱体抗压 强度 $f_c$ /MPa	弹性模量 $E_c$ /MPa	峰值应变 $\epsilon_0$ / $\mu\epsilon$
S	87.1	85.3	35 046	3 269
CF0.3	89.9			

注: S 代表静力试验梁的编号, CF0.3 对应于最大疲劳荷载 0.3 倍静极限荷载的疲劳试验梁编号.

试验梁内的纵向受力钢筋采用直径为 20 mm 的 HRB400(III级)钢筋, 架立筋和箍筋采用直径分别为 10 mm 和 8 mm 的 HPB235(II级)钢筋. 实测的 HRB400 纵向钢筋的屈服强度为 473 MPa, 极限强度为 619 MPa.

1. 3 疲劳试验荷载选取

对于公路桥梁而言, 疲劳荷载下限值  $M_{\min}$  通常为桥梁结构自重以及桥面附属设施等的静荷载作用产生的弯矩值, 而弯矩上限值  $M_{\max}$  与车辆类型及分布等情况有关. 在相同的疲劳荷载作用次数下, 低应力幅引起的桥梁损伤很小, 随着应力幅的增长, 桥梁损伤则约呈 3~5 次方急剧增长. 然而由不同弯矩幅值下的车辆比例(如表 3 所示)可以看出, 低应力幅的作用次数远高于中

高应力幅值. 因而, 本次试验选用低中弯矩幅水平的分界点  $0.25 M_u$  作为等幅疲劳加载的控制值. 疲劳荷载下限值取为  $M_{\min}=0.05M_u$ , 疲劳荷载上限值  $M_{\max}$  取为  $0.3 M_u$ , 其中  $M_u$  为静极限承载力.

1. 4 试验加载方案及测点布置

试验均采用 3 分点加载方式. 静载试验梁采用千斤顶进行分级加载. 疲劳试验梁采用疲劳机进行正弦波形加载, 疲劳加载频率取为 4 Hz, 先做 2 次加卸载循环的静载试验, 然后进行疲劳加载, 当疲劳加载次数达到 1、2、5、10、20、50、100、150 和 200 万次时, 停机进行一次加卸载循环的静载试验(试验方法与静载试验梁类似). 所有试验梁在跨中沿截面高度方向均匀的布置 5 片胶基箔式电阻应变片, 钢筋应变分别布置在跨中和加载点内侧, 百分表布置于跨中、加载点和支座处, 裂缝观测位置为钢筋附近.

表 3 钢筋混凝土桥梁弯矩幅水平等级划分<sup>[7]</sup>

Tab.3 Divided Bending moment amplitude

弯矩幅水平等级	低	中	高
应力幅范围	$\Delta\sigma < 0.25M_u$	$0.25M_u < \Delta\sigma < 0.40M_u$	$\Delta\sigma > 0.40M_u$
车辆比例	98.11	1.84	0.05

2 钢筋 RPC 梁静力和疲劳试验结果与分析

2. 1 静力试验结果与分析

钢筋 RPC 梁的静载破坏属于适筋梁破坏, 破坏始于受拉区钢筋的屈服, 然后跨中位置的 RPC 被压溃, 典型的破坏形态如图 3 所示. 荷载挠度曲线如图 4 所示. 试验过程中, 当加载力达 50 kN 左右时, 梁纯弯段受拉区以及加载点附近开始出现竖向弯曲裂缝, 然而由于钢纤维的阻裂作用, 其裂缝宽度值较小, 仅为 0.02 mm 左右. 同时, 开裂导致截面刚度降低, 荷载挠度曲线略微向挠度轴倾斜. 此后继续加载, 新的裂缝不断产生, 并发出钢纤维拔出的“啪啪”声. 当加载力达到 280 kN 左右时, 在跨中 RPC 应变片粘贴位置的左右, 1 条主裂缝急剧开展, 挠度急剧增大, 中和轴高度迅速上升, 导致受压区 RPC 被压溃, 钢筋 RPC 梁丧失承载力, 此时的主裂缝的最大宽度  $W_{\max}$  为 1 mm, 跨中挠度值  $f$  为 25 mm, 受压区 RPC 的极限应变值约  $\epsilon_c$  为 3 154  $\mu\epsilon$ , 纵向受拉钢筋应变值  $\epsilon_s$  约为 3 406  $\mu\epsilon$ . 实测的钢筋 RPC 梁的开裂弯矩  $M_{cr}$  和极限弯矩  $M_u$  分别为 15 kN·m 和 84 kN·m, 二者的比值约为

0.18, 远高于普通钢筋混凝土梁的相应比值 0.1<sup>[8]</sup>. RPC 梁的开裂弯矩  $M_{cr}$  和极限弯矩  $M_u$  的比值高于普通混凝土梁开裂弯矩和极限弯矩的比值主要是由于 RPC 基体材料和掺入的钢纤维具有较高的抗拉能力提高了 RPC 梁的抗裂性能使得钢筋 RPC 梁开裂荷载较大, 此外 RPC 材料较高的弹性模量值使得钢筋 RPC 梁具有良好的抗变形能力. 实测的钢筋 RPC 梁静载破坏时相关物理参数的值见表 4.

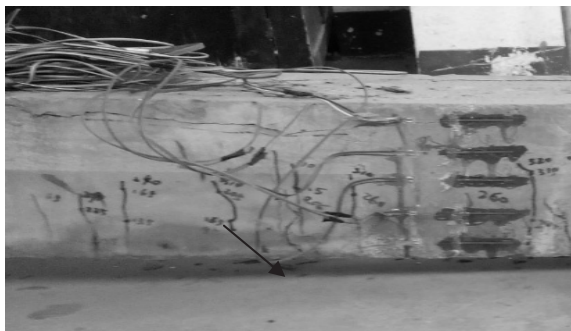


图3 静载试验梁破坏形态  
Fig.3 Failure mode of the test beam

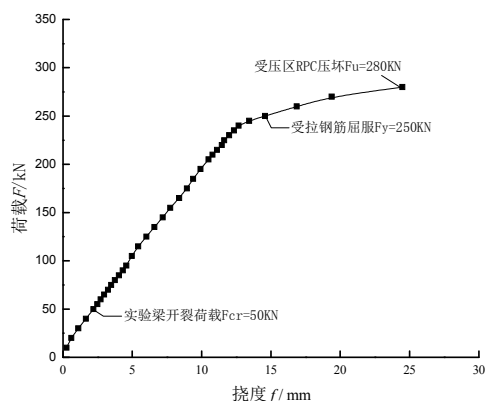


图4 荷载挠度曲线  
Fig.4 Load-Deflection curve

表4 静力和疲劳试验相应参数实测值  
Tab. 4 Measured values of static and fatigue tests

试验梁编号	S	CF0.3	疲劳/静力
最大裂缝宽度/mm	1	0.12	12%
跨中挠度/mm	25	6.438	25.8%
受压区边缘 RPC 应变/ $\mu\epsilon$	3 154	1 010	32%
受拉钢筋应变/ $\mu\epsilon$	3 406	987	30%

注: 试验梁 S 相关参数值为静载破坏时的结果值. 试验梁 CF0.3 为疲劳 200 万次结束时的结果值.

## 2.2 疲劳试验结果与分析

钢筋 RPC 梁在疲劳荷载作用下未发生疲劳破坏. 因而可以看出, 按本文设计的钢筋 RPC 梁在以出现概率为 98.11 % 的桥梁疲劳应力幅值作用下, 其疲劳寿命值至少 200 万次以上. 此外, 文献[9]指出: 混凝土内部微裂缝失稳扩展时, 其纵向总应变与加载历史无关. 与静载破坏一样, 混凝土的疲劳破坏亦是由于材料内部的微

缺陷不断扩展形成连续的不稳定裂缝所引起的. 故, 由表 4 可看出, 钢筋 RPC 梁疲劳结束时最大裂缝宽度、跨中挠度、受压边缘 RPC 应变和受拉钢筋应变分别为静载破坏时的 12 %、25.8 %、32 % 和 24.3 %, 远未达到其破坏值. 钢筋 RPC 梁能较好的满足公路桥梁使用要求.

### 2.2.1 钢筋 RPC 梁裂缝

等幅疲劳荷载作用下的钢筋 RPC 梁疲劳裂缝的分布与走向如图 5 所示.

在前 2 次静力加卸载循环过程中, 当加载至 50 kN 左右, 钢筋 RPC 梁在加载点内侧出现了竖向弯曲裂缝, 在剪弯段靠近加载点处亦出现少量短细的竖向裂缝. 此后继续加载, 当加载至疲劳最大荷载  $F_{max}=67.2$  kN 时, 梁上几乎没有新裂缝产生, 此时的最大裂缝宽度仅为 0.02mm.

在疲劳加载阶段, 不同疲劳加载次数下钢筋的裂缝数量与前 2 次静力加载阶段相比, 并不见明显增多. 而疲劳最大荷载作用下的裂缝宽度随不同疲劳加载次数的变化规律如图 6 所示. 由该图可见, 试验梁裂缝宽度随疲劳加载次数的增加不断增大, 裂缝宽度的发展速率不断降低, 表现为 2 阶段发展规律. 实测的 200 万次疲劳结束时的最大裂缝宽度约为 0.12 mm, 相比第 1 次静力加载时的最大裂缝宽度值增加了约 6 倍, 但仍小于极限破坏时的裂缝宽度值 1mm.

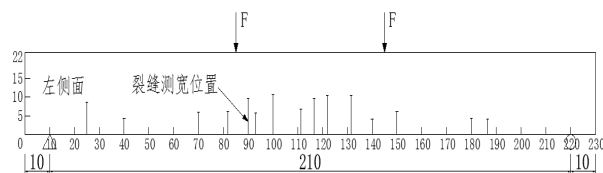


图5 等幅疲劳试验梁裂缝分布  
Fig.5 Crack distribution of constant-amplitude fatigue tests

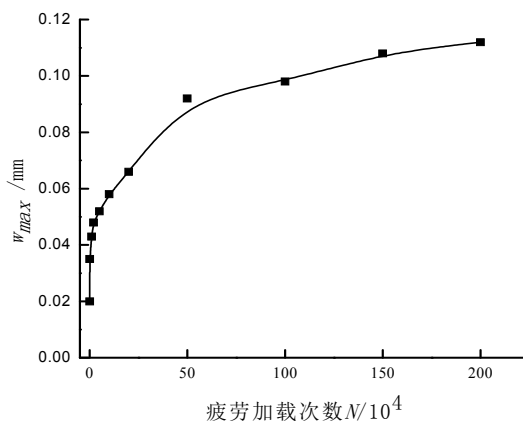


图6 不同加载次数下的最大裂缝宽度  
Fig.6 Maximum crack width under different loading times

## 2.2.2 钢筋 RPC 梁挠度

挠度是梁刚度变化的反应.不同疲劳加载次数下试验梁跨中挠度随加载荷载值的变化规律如图7所示,跨中最大挠度与残余挠度随疲劳加载次数的变化规律如图8所示.

由图可见,最大挠度和残余挠度都随着疲劳加载次数的增加而逐渐增大,且具有与梁最大裂缝宽度相类似的两阶段发展规律,在荷载挠度曲线上表现为先疏后密的形态.此外不同加载次数下的荷载挠度曲线逐渐向挠度轴倾斜,说明钢筋RPC梁的刚度随着加载次数的增加明显降低.当200万次疲劳结束时,残余挠度值和最大挠度值分别为1.509 mm和6.438 mm.

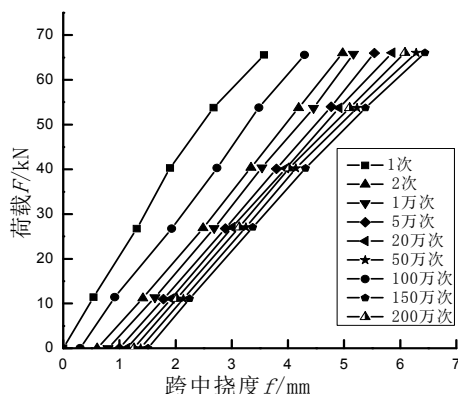


图7 不同加载次数荷载挠度曲线

Fig.7 Load-deflection curve in different loading times

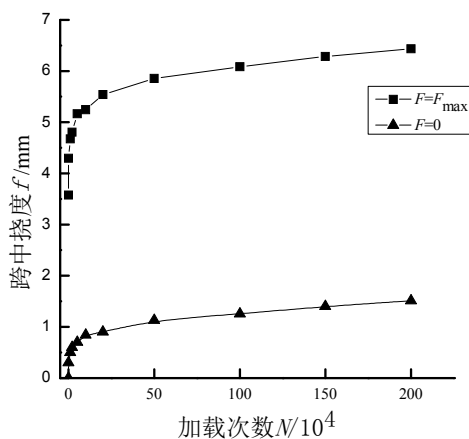


图8 挠度随  $N$  发展曲线

Fig.8 Relationship between deflection and  $N$

## 2.2.3 RPC 应变

等幅疲劳荷载作用下钢筋RPC梁受压区边缘RPC累积残余应变和总应变随疲劳加载次数的变化规律如图9所示,不同加载次数下RPC应变随加载荷载值的变化规律如图10所示.由图可见:

钢筋RPC梁受压区边缘RPC的残余应变和总应变均随着疲劳加载次数的增加而增大,二者

的发展均体现出2阶段规律,第一阶段结束时的加载次数约为50万次左右,在该阶段受压区RPC的累积残余应变值和总应变值均发展较快,增长速率随着加载次数的发展逐渐降低.实测的该阶段结束时的累积残余应变值为223  $\mu\epsilon$ ,总应变值为927  $\mu\epsilon$  分别约为静载破坏时的RPC极限应变值(3154  $\mu\epsilon$ )的7.1%和29.4%.第二阶段发展较慢,其增长速率基本为一定值,疲劳200万次结束时的累积残余应变值为298  $\mu\epsilon$ ,总应变值为1010  $\mu\epsilon$ ,分别约为静载破坏时的RPC极限应变值(3154  $\mu\epsilon$ )的9.4%和32%.而荷载应变曲线的斜率随加载次数的变化相对较小,表明受压区RPC变形模量降低程度不大.

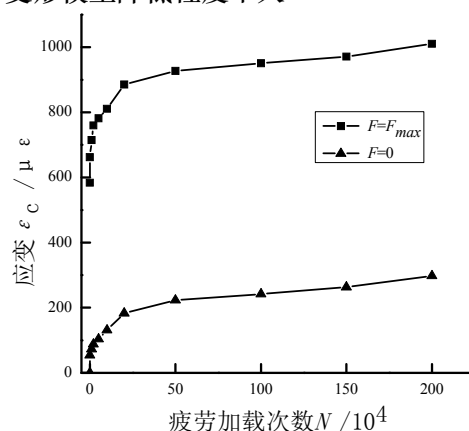


图9 RPC应变随  $N$  发展曲线

Fig.9 Relationship between RPC strain and  $N$

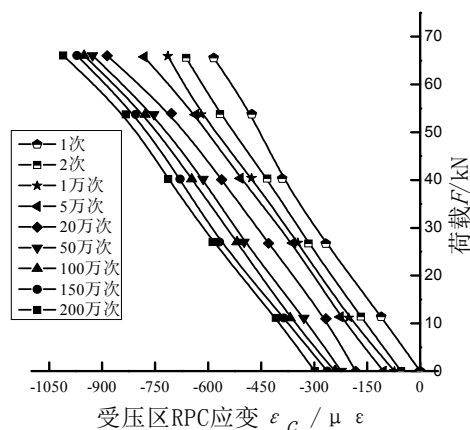


图10 不同加载次数后RPC应变

Fig.10 RPC strain in different loading times

## 2.2.4 钢筋应变

图11为等幅疲劳荷载作用下钢筋应变随加载次数的变化规律,图12为不同疲劳加载次数后钢筋应变随加载荷载的变化规律.

由这两图可以看出:在第一次加载时,当荷载加载50 kN左右时,钢筋的应变突然增大,荷载应变曲线的斜率降低,卸载完成时的钢筋残余

应变值约为  $40 \mu\epsilon$ 。在疲劳加载过程中,钢筋的残余应变和总应变亦表现为 2 阶段发展过程。当加载到 50 万次时,钢筋的残余应变值比第一次加载的残余应变值约增加了 2.75 倍,200 万次疲劳结束时,钢筋的残余应变值比第一次加载的残余应变值增加了约 3.675 倍。

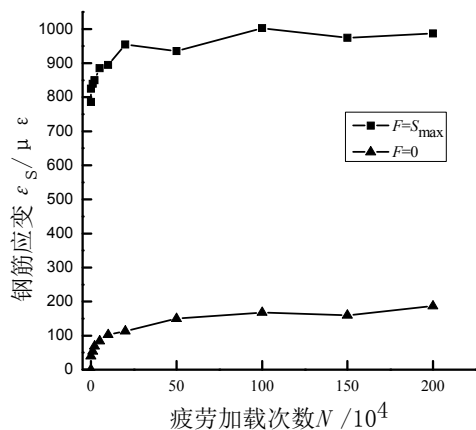


图 11 钢筋应变随  $N$  发展曲线

Fig.11 Relationship between steel strain and  $N$

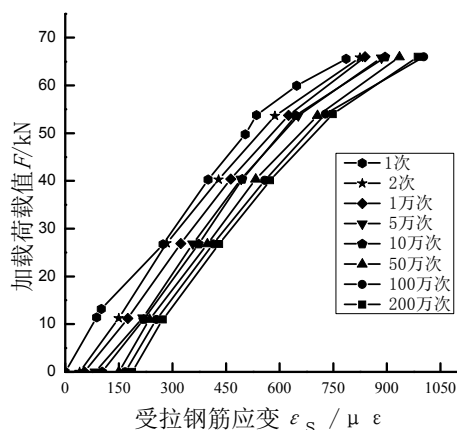


图 12 不同加载次数后钢筋应变

Fig.12 The steel strain in different loading times

### 3 结论

(1) 按本文设计的钢筋 RPC 梁,其静载破坏形态为受弯破坏。钢筋 RPC 梁的开裂弯矩与极限弯矩值的比值达 0.18,远高于普通钢筋混凝土梁的相应比值 0.1,体现出较好的抗裂性能。

(2) 钢筋 RPC 梁以出现概率为 98.11%的桥梁应力幅值进行疲劳加载,其疲劳寿命达 200 万次以上。

(3) 钢筋 RPC 梁裂缝宽度、跨中挠度、受压区边缘 RPC 应变以及钢筋应变随着疲劳加载次数的增加均呈现出 2 阶段发展规律,即快速发展阶段和平稳发展阶段。且疲劳 200 万次结束时

的相应值分别约为静载破坏的 12 %、25.8 %、32 %和 24.3 %。体现出较好的抗疲劳性能。

### 参考文献 References

- [1] RICHARD P, CHEYTEZY M. Reactive powder concrete with high ductility and 200~800 MPa compressive strength[J]. ACI 1997,144,: 507-518.
- [2] 王月, 安明喆, 余自若, 等. 活性粉末混凝土力学性能研究现状[J]. 混凝土, 2013(12):21-26.  
WANG Yue, AN Mingzhe, YU Ziruo, et al. Research on the mechanical properties of reactive powder concrete: a review[J]. Concrete, 2013(12):21-26.
- [3] 安明喆, 贾方方, 余志若, 等. 活性粉末混凝土受弯构件中钢筋粘结性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(8): 105-110.  
AN Mingzhe, JIA Fangfang, YU Ziruo, et al. Bond properties of reinforcement anchored in reactive powder concrete flexural members [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(8): 105-110.
- [4] 李莉. 活性粉末混凝土梁受力性能及设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
LI Li. Mechanical behavior and design method for reactive powder concrete beams [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [5] 郑文忠, 李莉, 卢珊珊. 钢筋活性粉末混凝土简支梁正截面受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6).  
ZHENG Wenzhong, LI Li, LU Shanshan. Experimental research on mechanical performance of normal section of reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(6).
- [6] Y.S.Tai. Uniaxial Compression tests at various loading rates for reactive powder concrete[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2009, 52(1):14~21.
- [7] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
SONG Yupu. Fatigue performance and design principles of concrete structures and design principles[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.
- [8] 朱红兵. 公路钢筋混凝土简支梁桥疲劳试验与剩余寿命预测方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
ZHU Hongbing. Method and Experiment research on highway reinforced concrete simply-supported girder bridge's fatigue residual service life forecast[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [9] 王兆宁. 活性粉末混凝土矩形截面配筋梁抗弯性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.  
WANG Zhaoning. Research on flexural behavior of reactive powder concrete rectangular beam with steel bars[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [10] 王瑞敏, 宋玉普, 赵国藩. 混凝土在等幅重复应力作用下的疲劳强度[J]. 工业建筑, 1992(12):8-11.  
WANG Ruimin, SONG Yupu, ZHAO Guofan. Fatigue strength of concrete under constant amplitude repeated loading[J]. Industrial Construction, 1992(12):8-11.

(编辑 沈波)