

无粘结预应力 RPC 梁疲劳性能试验

罗许国,王义翔,汪建群

(湖南科技大学土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要 目的 研究对比两种试验梁的静力及疲劳破坏形态. 方法 采用静载和等幅疲劳试验的方法,通过测量仪器采集和分析两种 RPC 梁挠度、裂缝宽度、钢筋应变和 RPC 应变. 结果 在出现概率为 98% 的桥梁应力幅作用下,两种试验梁的疲劳寿命都在 200 万次以上;对于无粘结预应力 RPC 梁,梁裂缝宽度、受压区边缘应变、跨中挠度、钢筋应变分别为 0.08 mm 、 814×10^{-6} 、 7.6 mm 、 484×10^{-6} ,对于普通钢筋 RPC 梁分别为 0.12 mm 、 $1\,147 \times 10^{-6}$ 、 10.3 mm 、 $1\,226 \times 10^{-6}$,远小于静载破坏对应值. 结论 两种试验梁都体现出了较好的耐疲劳性能,其中无粘结预应力 RPC 梁的耐疲劳性能强于普通钢筋 RPC 梁.

关键词 无粘结预应力 RPC 梁;普通钢筋 RPC 梁;静载试验;疲劳试验

中图分类号 TU378.2 文献标志码 A

Experimental Study on Fatigue Behavior of Unbonded Prestressd RPC Beams

LUO Xuguo, WANG Yixiang, WANG Jianqun

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

Abstract: The study compared the fatigue properties of the two test beams. Using static and equal amplitude fatigue tests, the two RPC beam deflections, crack widths, steel strain and RPC strain are collected and analyzed by measuring instruments. The fatigue test results show that the fatigue life is more than 2 million cycles for the two test beams under the stress of the bridge with probability of 98%. After 2 million fatigue loading, the crack width of the test beam, the strain at the edge of the compression zone, the mid-span deflection, the ordinary steel strain are 0.08 mm , 814×10^{-6} , 7.6 mm and 484×10^{-6} , respectively. For the unbonded prestressed RPC (UPRPC) beams, they are 0.12 mm , $1\,147 \times 10^{-6}$, 10.3 mm , and $1\,226 \times 10^{-6}$, respectively for the ordinary reinforced RPC (ORRPC) beams. All of these values obtained from the fatigue test are significantly below the corresponding failure values under the static test. The results show that both test beams show better fatigue resistance, and the fatigue resistance of unbonded prestressed RPC beams is stronger than that of ordinary reinforced RPC beams.

Key words: URRPC; ORRPC; static load tests; fatigue tests

收稿日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51408218);湖南省教育厅项目(14A048)

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等方面研究.

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete,RPC)是20世纪90年代研制出的新型高强混凝土,由水泥、石英砂、硅灰、钢纤维、高效减水剂等拌合而成的新型水泥基复合材料^[1-3].从RPC的出现至今,国内外对其配合比、耐久性、养护环境已经展开了深入的研究,对RPC构件在静力性能方面也做了大量试验^[4-6],但对RPC构件的疲劳性能研究还相对较少.如海洋工作平台、高层房屋建筑及公路和铁路桥梁等结构不可避免会承受反复荷载的作用,并在低于静载强度的情况下发生脆性破坏.以普通混凝土为研究对象建立起来的疲劳损伤性能已不能充分体现RPC构件的疲劳损伤性能^[7-8].笔者通过对4根RPC梁进行静力和疲劳试验,研究两种RPC梁在疲劳荷载作用下的疲劳性能,且获得了两种类型梁的裂缝、跨中挠度、受压区边缘RPC应变和钢筋应变变化规律,使得RPC材料在工程上的使用能够得到理论支撑,为施工及设计提供理论依据.

1 试 验

1.1 材料与制作

试验共设计了4根活性粉末混凝土梁,其中两根为普通钢筋活性粉末混凝土梁,其余为无粘结预应力活性粉末混凝土梁.所有梁都具有相同截面尺寸和配筋率.依据文献[9]进行截面配筋,配筋及尺寸如图1、图2所示.其中,混凝土为湖南大学研制的活性粉末混凝土,非预应力纵向受拉钢筋为HRB400,箍筋和架立钢筋均采用HPB235,预应力钢筋采用 $\Phi^j=15.2(f_{ptk}=1\,860\text{ MPa})$ 钢绞线,为防止试验梁发生斜截面破坏,在其剪弯段配置一定量箍筋,实际配筋率为3.3%,符合规范要求.浇筑混凝土梁的同时制作12个尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试块和12个尺寸为100 mm×100 mm×300 mm棱柱体试块,用于测量28 d立方体抗压强度、抗拉强度、棱

柱体抗压强度和RPC弹性模量.材料配合比:水泥(韶峰水泥P.O42.5)770 kg/m³、硅灰193 kg/m³、细砂1 078 kg/m³、FDN高效减水剂19 kg/m³、钢纤维77 kg/m³、水193 kg/m³.材料试验结果见表1.试验梁中,1根普通钢筋RPC与1根无粘结预应力RPC梁进行静载试验,用于确定疲劳加载荷载水平的参考值,剩余2根梁进行疲劳试验.

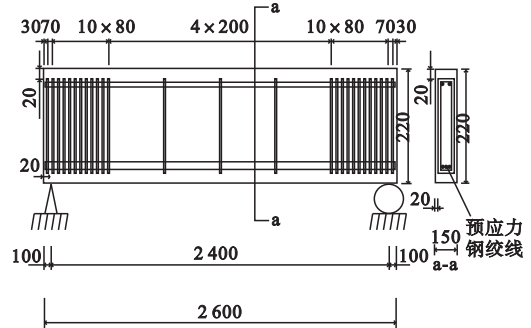


图1 无粘结预应力RPC梁

Fig. 1 Unbonded prestressed RPC beams

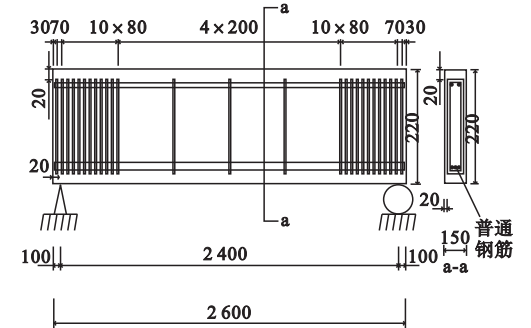


图2 普通钢筋RPC梁

Fig. 2 Ordinary reinforced RPC beams

表1 活性粉末混凝土力学性能

Table 1 Measured mechanical properties of RPC beams

梁编号	立方体	棱柱体	轴心抗	RPC弹 性模量
	抗压强度	抗压强	拉强度	
	f_{cu}/MPa	度 f_c/MPa	f_t/MPa	E_c
S	79.9	74.1	8	34 752
C _F	67.6	74.1	8	34 752
S ₁	75.3	76.2	8	35 046
C _{F-1}	77.1	76.2	8	35 046

注:静载试验中,S代表无粘结预应力RPC梁;S₁代表普通钢筋RPC梁;疲劳试验中;C_F代表无粘结预应力RPC梁;C_{F-1}代表钢筋RPC梁.

1.2 测点布置

在荷载作用下,梁体会发生变形,需测试出荷载作用下 RPC 梁的应变及挠度变化值.通过测试值可以反映梁体在荷载作用下的强度和刚度变化情况^[10].使用 100 mm × 3 mm 的胶基箔式应变片进行应变数据采集,所有试验梁在跨中位置沿着截面竖直高度方向每隔 50 mm 粘贴一片应变片,具体位置见图 3. 同时在每根试验梁跨中及加载点位置处的钢筋上各布置一片 50 mm × 3 mm 的应变片,具体位置见图 4. 试验过程中通过百分表来测量试验梁挠度,分别在加载点处、支座位置和跨中位置布置百分表,具体见图 5.

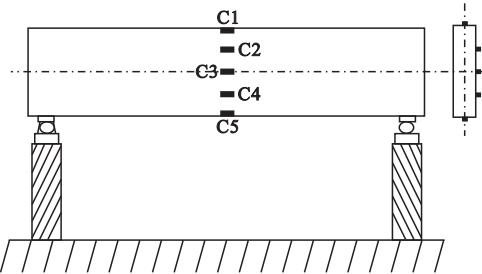


图 3 RPC 梁侧面应变片

Fig. 3 RPC beam side strain gauge

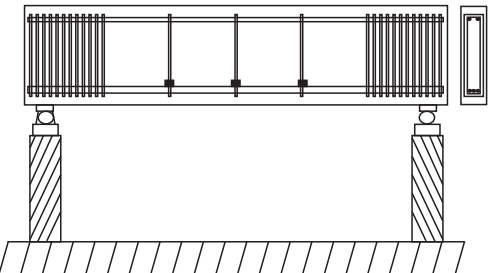


图 4 受拉区钢筋应变片

Fig. 4 Tension zone steel strain gauge

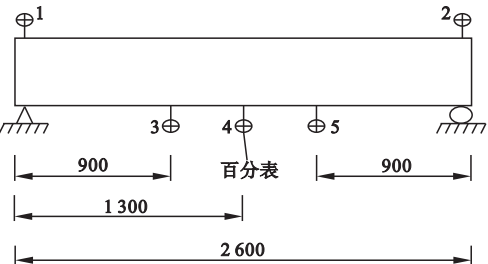


图 5 百分表布置图

Fig. 5 Layout of dial indicator

试验梁在试验前需对预应力钢筋进行张拉,本次试验张拉控制应力为 $\sigma_{con} = 0.6f_{ptk}$. 预应力张拉采用单端张拉的方式:首先对预应力筋进行预张拉,为其张拉控制应力的 10% 左右;然后按控制应力 20%、40%、60%、80%、100% 的方式分 5 个等级进行张拉,每个等级张拉结束后,对预应力钢绞线的伸长值进行测量,并检查其伸长值与理论值的比值.试验梁端安装压力传感器可以在预应力钢绞线张拉阶段与试验阶段通过压力传感器测试钢绞线张拉力和试验荷载作用下钢绞线的应力.

1.3 静载试验加载方案

本次试验由静载试验及疲劳试验组成.进行静载试验的目的是为了确定 RPC 梁的静力破坏性能及疲劳荷载上限值.通过静载试验可以得到两种类型试验梁的极限承载力,并利用极限承载力计算两种类型梁疲劳荷载上限值.通过静载试验能够测试并检验出试验梁的破坏形态及其制作的质量.此次静载试验使用三分点加载^[11-12],具体加载过程参照文献[13]:

(1) 正式试验前,首先进行预加载,本次试验的预加载值为 10 kN,进行预加载的目的是考察加载装置、百分表及应变仪等仪器是否能够正常工作.

(2) 在正式试验阶段,以每级 10 kN 加载,当荷载值靠近 RPC 梁计算的开裂荷载估计值的 85% 时,为了方便捕抓 RPC 梁的开裂特征荷载,加载值改为每级 5 kN.开裂以后,每级加载值取为 10 kN.当加载值接近 RPC 梁计算极限荷载值的 80% 后,加载值取 5 kN 一级直至 RPC 梁破坏.每级持续时间为 10 ~ 15 min,并记录整个试验加载过程中荷载作用下混凝土应变、钢筋应变、百分表数据和预应力值.当梁开裂后,使用裂缝观测仪读取裂缝宽度并用黑色笔标记裂缝具体位置及其发展方向.静载试验装置见图 6.

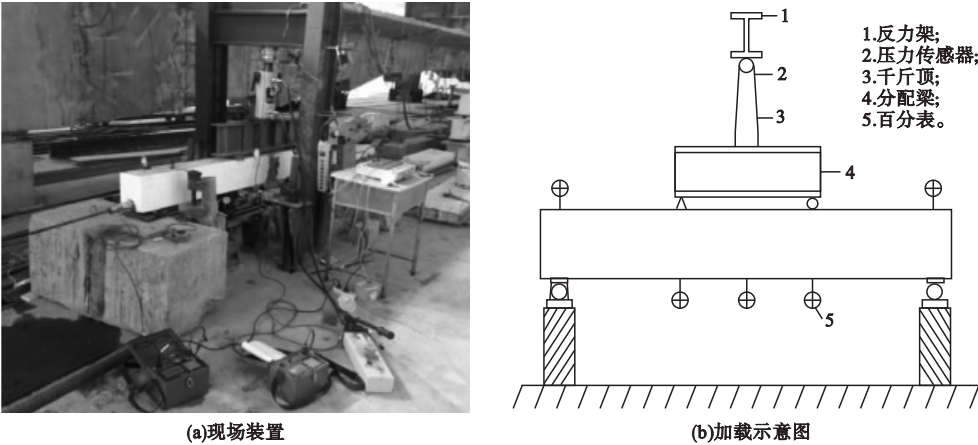


图6 静载试验装置

Fig. 6 The field static load test equipment

1.4 疲劳试验加载方案

试验选用桥梁弯矩幅出现概率为 98% 的弯矩幅值作为疲劳荷载,如表 2 所示^[14]. 疲劳荷载下限值取 $M_{\min}=0.05 M_u$,上限值取 $M_{\max}=0.3 M_u$,其中 M_u 为静极限承载力.

表 2 弯矩幅水平等级划分

Table 2 Level grades of bending moments		
弯矩幅水平等级	应力幅范围	车辆比例/%
低	$\Delta\sigma < 0.25M_u$	98.11
中	$0.25M_u \leq \Delta\sigma \leq 0.40M_u$	1.84
高	$\Delta\sigma > 0.40M_u$	0.05

疲劳加载方案如下^[15-18]：

(1)静载和疲劳试验均使用 PMS-500 型液压脉动疲劳试验机进行,在疲劳试验开始前,先做 2 次加卸载循环的静力试验.加载时分七个等级加载至最大荷载.

(2)完成加卸载循环后,对试验梁进行疲劳加载,当加载重复次数 $N=1.2 \times 10^4$ 、 5×10^4 、 20×10^4 、 50×10^4 、 100×10^4 、 150×10^4 、 200×10^4 时,停止疲劳试验,并静力加载至最大荷载,在每级加卸载结束后,持荷 10 min 左右.观察并记录试验梁各部位裂缝宽度、挠度、混凝土和钢筋应变以及裂缝发展.疲劳试验加载装置见图 7.



图7 疲劳试验装置

Fig. 7 The field fatigue test equipment

2 试验结果与分析

2.1 静载试验结果与分析

用于静载试验的无粘结预应力 RPC 梁破坏时,受拉区普通钢筋屈服,受压区混凝土被压坏,受拉预应力筋达到极限应力增量.静载试验的普通钢筋 RPC 梁也出现了相同的破坏特征,即普通钢筋屈服然后受压区混凝土被压坏.两种试验梁破坏形态如图 8、图 9 所示.静载试验结果对比见表 3.从表 3 可以看出,无粘结预应力 RPC 梁的开裂弯矩与极限弯矩之比为 0.28,远高于普通 RPC 梁 0.18 的比值,而普通钢筋 RPC 梁 0.18 的比值高于普通钢筋混凝土梁 0.1 的比值^[19-20].



图 8 无粘结预应力 RPC 梁破坏形式

Fig. 8 Failure form of unbonded prestressed RPC beam

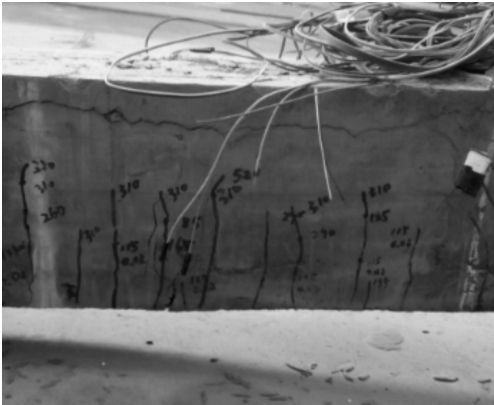


图 9 钢筋 RPC 梁破坏形式

Fig. 9 Failure form of reinforced RPC beam

表 3 RPC 梁开裂荷载和极限荷载实测值

Table 3 RPC beam cracking load and ultimate load measured value

梁编号	开裂荷载 $M_{cr}/(kN \cdot m)$	极限荷载 $M_u/(kN \cdot m)$	$\frac{M_{cr}}{M_u}$
S	30.5	108.5	0.28
S _I	17.2	93.8	0.18

注:表中结果已经考虑试验梁自重效应;S 表示无粘结预应力 RPC 梁;S_I 表示普通钢筋 RPC 梁。

试验梁荷载 - 挠度曲线如图 10、图 11 所示。由图可知,无论是无粘结预应力 RPC 梁还是普通钢筋 RPC 梁,荷载 - 挠度曲线都表现出三阶段变化规律。其中无粘结预应力 RPC 梁三阶段规律更加明显且挠度曲线斜率变化速度更快,即无粘结预应力 RPC 梁在荷载作用下刚度退化速度更快,主要原因是无粘结预应力钢筋对截面具有削弱作用。

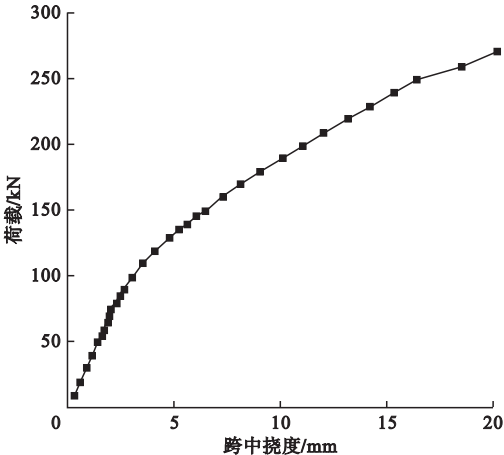


图 10 无粘结预应力 RPC 梁跨中荷载 - 挠度曲线

Fig. 10 Load-midspan deflection curve for UPRPC beam

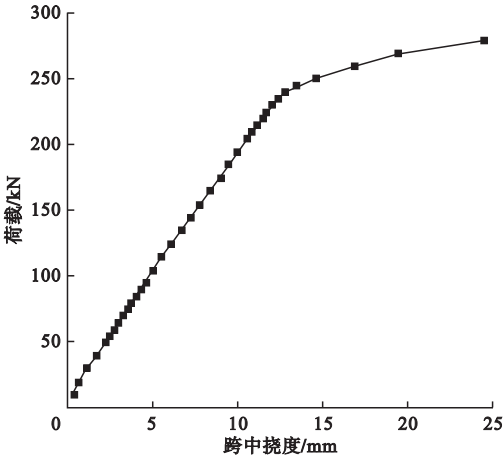


图 11 钢筋 RPC 试验梁跨中荷载 - 位移曲线

Fig. 11 Load- midspan displacement curve for reinforced RPC test beam

截面应变沿梁高方向分布曲线如图 12、图 13 所示。两种试验梁在荷载作用下截面应变满足平截面假定,随着荷载的增加中性轴都有上移的趋势,其中无粘结预应力 RPC 梁中性轴移动速度相对较慢。无粘结预应力 RPC 梁预应力筋应力增量如图 14 所示。从图中可以看出,当荷载达到 75 kN 后无粘结预应力 RPC 梁开始开裂,截面开裂后无粘结预应力钢筋应力增长速度加快,这是由于混凝土和预应力钢筋之间发生相对滑动,且应力沿着整根无粘结预应力钢筋全长方向呈线性分布,使得预应力梁破坏时预应力钢筋还

未达到屈服状态。

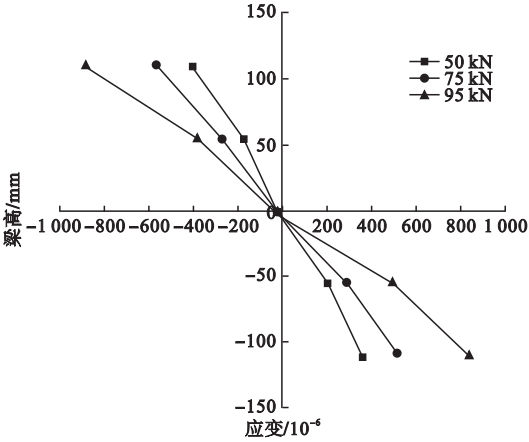


图 12 无粘结预应力RPC梁跨中截面应变曲线
Fig. 12 Cross-span strain curves of UPRPC beam

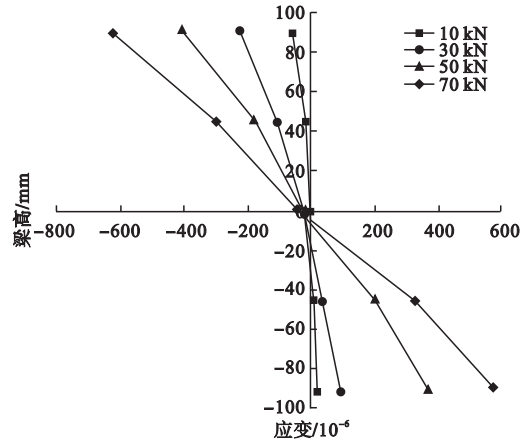


图 13 钢筋RPC梁的跨中截面应变曲线
Fig. 13 Cross-span strain curves of ORRPC beam

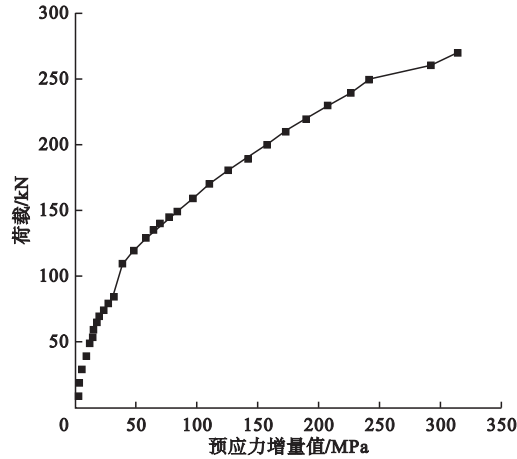


图 14 荷载-预应力增量
Fig. 14 Load-prestress increment

2.2 疲劳试验结果与分析

2.2.1 疲劳裂缝

疲劳试验前进行的一次静力试验过程中,当加载值达到约 50 kN 时,普通 RPC 梁在加载点内侧附近出现竖向裂缝,弯剪段靠近加载点处也出现了少量短细斜裂缝.当加载值到疲劳荷载上限值时,普通 RPC 梁上最大裂缝宽度为 0.02 mm.对于预应力 RPC 梁,当荷载加载到 75 kN 左右时,才出现了与普通钢筋 RPC 梁相似的开裂特征现象.此后继续加载至疲劳荷载水平上限值 81 kN 左右时,预应力梁上最大裂缝宽度为 0.015 mm,且此时无粘结预应力 RPC 梁上几乎没有出现新的裂缝.在疲劳加载阶段,不同疲劳加载次数下两种 RPC 梁裂缝数量与第 1 次加载阶段相比,并没有明显增多.但是试验梁的裂缝宽度在不断增大,而其裂缝宽度的发展速率在不断下降.普通钢筋 RPC 梁在 200 万次循环荷载作用下,疲劳荷载水平上限值对应的最大裂缝宽度值(0.12 mm)约为第一次静力加载下的 6 倍.然而预应力 RPC 梁的(最大裂缝宽度值为 0.08 mm)则约为 5 倍.无粘结预应力 RPC 梁裂缝宽度及裂缝发展速度小于普通 RPC 梁,由于预应力的存在,有效地限制了预应力梁疲劳裂缝的发展且提高了混凝土梁的抗裂性能.两种试验梁裂缝宽度随疲劳加载次数的变化见图 15.

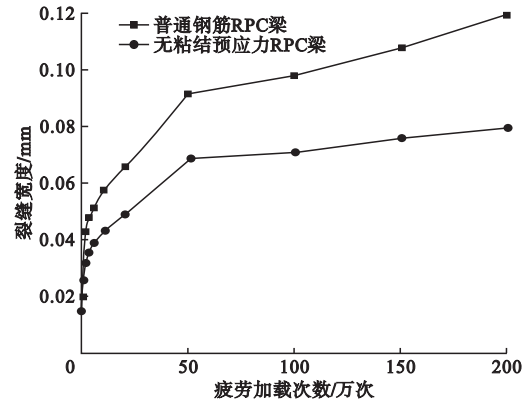


图 15 不同疲劳加载次数下最大裂缝宽度
Fig. 15 Variations of crack width versus loading cycles

2.2.2 RPC 梁跨中挠度

随着疲劳荷载循环次数的不断增加,混凝土损伤不断累积,试验梁刚度不断下降.不同循环加载次数下,普通钢筋 RPC 和预应力 RPC 试验梁跨中挠度平均值变化曲线见图 16.从图中可以看出,两种试验梁挠度曲线都呈现出一种先疏散后密集的形状且有向挠度坐标轴偏斜的趋势,此外随着疲劳荷载循环次数的增加,RPC 梁的挠度也在不断增大,这表明在重复疲劳荷载作用下,两种 RPC 试

验梁的刚度随加载重复次数的增加呈现不断减小的趋势.当 200 万次加载循环结束后,无粘结预应力 RPC 梁跨中挠度值与第一次加载时产生的跨中挠度值的比值为 1.8,而普通钢筋 RPC 梁的比值为 1.6.由此可见在疲劳荷载作用下,预应力 RPC 梁刚度退化速度比普通钢筋 RPC 梁快.从不同疲劳加载次数下挠度的变化曲线也能观察出该特点,即无粘结预应力梁挠度曲线向横向坐标轴倾斜速率比普通钢筋 RPC 梁快.

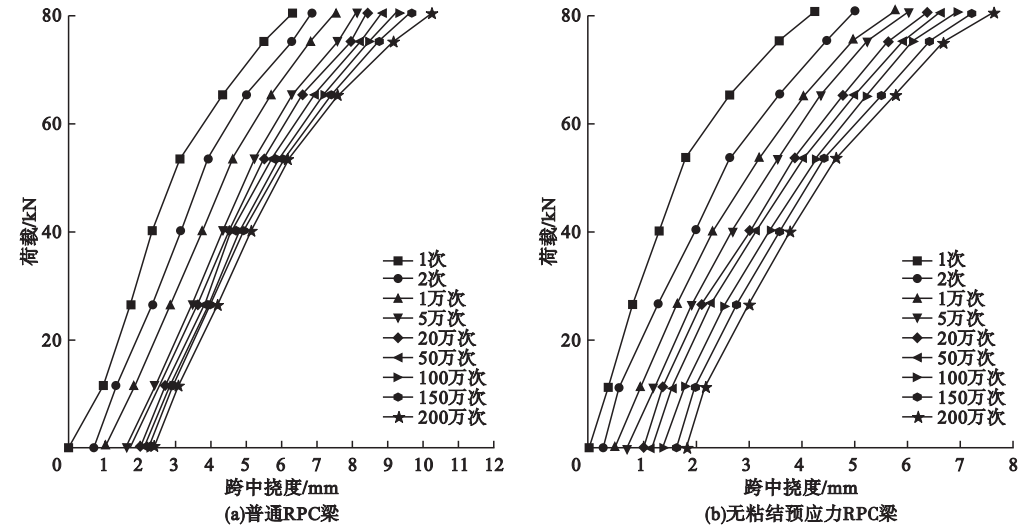


图 16 试验梁挠度变化曲线

Fig. 16 Deflection variation curves of beam

2.2.3 混凝土疲劳应变变化

不同疲劳加载次数下,RPC 梁应变变化

规律见图 17.

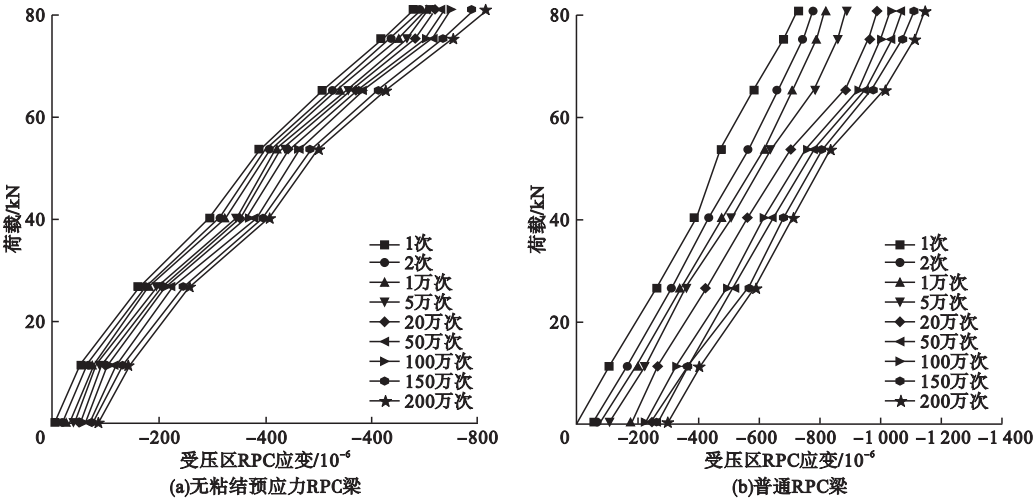


图 17 试验梁受压区 RPC 应变变化曲线

Fig. 17 Compressive strain variation curves of beam

从图中可以看出,随着疲劳加载次数的增加,受压区 RPC 应变也随之增大,同时残余应变值也呈现不断增大的趋势,这说明活性粉末混凝土材料在不断损伤. 200 万次疲劳循环加载结束后,实测预应力 RPC 梁受压区混凝土应变值为 -814×10^{-6} ,钢筋 RPC 梁受压区混凝土应变值为 $-1\,147 \times 10^{-6}$,与第一次疲劳加载结束后相比,无粘结预应力 RPC 梁受压区应变 (-678×10^{-6}) 增加了 1.2 倍,普通钢筋 RPC 梁受压区应变 (-717×10^{-6}) 增加了 1.6 倍. 由此可以得出普通钢筋 RPC 梁受压区强度退化速度比无粘结预应力 RPC 梁受压区强度退化速度快.

2.2.4 普通钢筋应变

图 18 分别为在重复荷载次数作用下,两种 RPC 梁荷载 - 受拉钢筋应变变化曲线. 从图中可以看出,200 万次循环加载后,荷载水平上限值所对应无粘结预应力 RPC 梁受拉钢筋应变(484×10^{-6})和钢筋 RPC 梁受拉钢筋应变($1\,226 \times 10^{-6}$)均为第一次静载作用下的受拉钢筋应变值的 1.3 倍,其中钢筋 RPC 梁在第一次荷载水平上限值时的钢筋应变为 943.1×10^{-6} ,无粘结预应力 RPC 梁的普通钢筋应变为 372×10^{-6} . 由此可知,试验梁开裂后,在疲劳加载作用下普通钢筋材料损伤速率是几乎相同的.

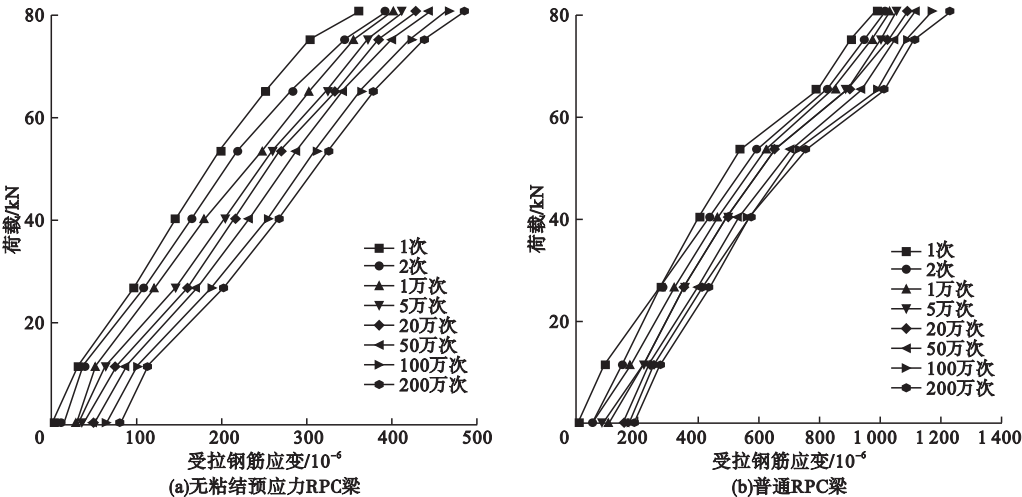


图 18 试验梁受拉区普通钢筋应变变化曲线

Fig. 18 Strain variation curves of common reinforcement of beam

2.2.5 预应力增量

图 19 为无粘结预应力活性粉末混凝土梁在不同疲劳加载次数下,预应力钢绞线应力增量平均值随疲劳加载荷载值的变化规律. 从图中可以看出,预应力钢筋的荷载 - 预应力增量曲线斜率随着疲劳加载次数的增加而减小,且逐渐上凸,但预应力钢筋并没有出现不可恢复的应力增量值.

2.3 试验结果对比

在公路桥梁中出现概率为 98% 的桥梁应力幅作用下,两种类型试验梁疲劳寿命都能达到 200 万次以上,且不发生破坏. 从试验

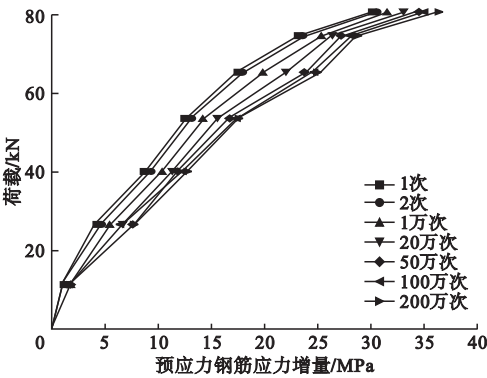


图 19 不同荷载加载次数下荷载 - 预应力增量曲线

Fig. 19 Load-prestress increment curves under different loading times

现象中看出,试验梁的疲劳破坏是由于混凝土材料内部的微裂缝缺陷发展成为不稳定、连续的裂缝引起的,这种破坏与试验梁静载破坏相类似.表4中列出了静载试验及疲劳试验结果对比值,从表中可以看出,200万次疲劳荷载循环加载后,试验梁裂缝宽度、跨中挠度、受压区混凝土应变、普通钢筋应变与静载试验结果相比,普通钢筋RPC梁比值

分别为9%、41%、36%、33%,无粘结预应力RPC梁比值分别为7%、37%、26%、13%,两种RPC梁疲劳结果远小于静载试验结果,能较好地满足目前公路桥梁的使用性能.无粘结预应力RPC梁疲劳试验结果小于普通钢筋RPC梁,即无粘结预应力RPC梁比普通钢筋RPC梁具有更好的抗疲劳性能.

表4 静载试验及疲劳试验结果对比

Table 4 Comparison of static load test and fatigue test results

试验梁编号	最大裂缝宽度/mm	跨中挠度/mm	受压区边缘RPC应变/ 10^{-6}	受拉钢筋应变/ 10^{-6}
S _I	1.30	25.00	3 154	3 715
C _{F-1}	0.12	10.30	1 147	1 226
S	1.10	20.16	3 154	3 715
C _F	0.08	7.60	814	484

注:静载试验结果中,S_I代表钢筋RPC梁,S代表无粘结预应力RPC梁;疲劳试验结果中,C_{F-1}代表普通钢筋RPC梁,C_F代表无粘结预应力RPC梁.

3 结 论

(1)按文中配筋方式设计的试验梁在静力荷载作用下表现出适筋梁的破坏特征.两种试验梁在静力荷载作用下的荷载-挠度曲线都表现出三阶段变化规律,其中无粘结预应力RPC梁荷载-挠度曲线三阶段规律更加明显.

(2)在疲劳荷载不同加载次数下,无粘结预应力RPC梁荷载-挠度曲线斜率变化速度比普通钢筋RPC梁变化速度快,即无粘结预应力RPC梁刚度退化速度比普通钢筋RPC梁刚度退化速度快.

(3)在疲劳荷载不同加载次数下,无粘结预应力RPC梁受压区RPC应变变化曲线比普通钢筋RPC梁应变变化曲线更加密集,无粘结预应力RPC梁受压区残余应变发展速度相对较慢,且无粘结预应力RPC梁疲劳裂纹发展速度比普通钢筋RPC梁发展慢,预应力的施加可以有效地限制疲劳裂纹的扩展.

(4)在疲劳荷载不同加载次数下,无论是无粘结预应力RPC梁还是普通钢筋RPC

梁,当截面开裂后受拉普通钢筋应变增长速率接近.

参考文献

[1] HALIT Y, MERT Y Y, HUSEYIN Y, et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag [J]. Cement and concrete composites, 2010, 32(8): 639-648.

[2] 张明德. RPC 混凝土的配制与应用研究[J]. 福建建材, 2010(4): 20-23.
(ZHANG Mingde. Study on the preparation and application of RPC concrete [J]. Fujian building materials, 2010(4): 20-23.)

[3] YANG Shengjiang. Experimental study on mechanical properties of RPC concrete with different curing systems [J]. Cryogenic architecture technology, 2013, 35(7): 20-22.

[4] 余自若, 秦鑫, 安明喆. 活性粉末混凝土的常规三轴压缩性能试验研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 40-44.
(YU Ziruo, QIN Xin, AN Mingzhe. Experimental research on the conventional triaxial compressive properties of reactive powder concrete [J]. China railway science, 2012, 33(2): 40-44.)

- [5] JIN Lingzhi, QI Kaineng, CAO Xia. Experimental study on shear behavior of high strength reinforced reactive powder concrete beam [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2013, 35(8): 108–113.
- [6] JI Wenyu, DING Bo, AN Mingzhe. Experimental study on the shear capacity of reactive powder concrete T-beam [J]. China railway science, 2011, 32(5): 38–42.
- [7] 姚婵娟. 混凝土疲劳损伤研究及寿命预测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(YAO Chanjuan. Fatigue damage and life prediction of concrete [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [8] 雷斌, 李宏, 晏育松. 混凝土疲劳机理研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(8): 1978–1983.
(LEI Bin, LI Hong, YAN Yusong. Research progress on the fatigue mechanism of concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2014, 33(8): 1978–1983.)
- [9] 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.)
- [10] SU Jian. Study on mechanical properties of unbonded and bonded prestressed concrete beams [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012.
- [11] 程东辉, 袁佳, 张鹏. 预应力 CFRP 布加固负弯矩混凝土梁试验 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2012, 28(6): 997–1003.
(CHENG Donghui, YUAN Jia, ZHANG Peng. Experiment research of loaded concrete beams reinforced with prestressed CFRP sheets [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(6): 997–1003.)
- [12] 卢姗姗. 配置钢筋或 GFRP 筋活性粉末混凝土梁受力性能试验与分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(LU Shanshan. Test and analysis of mechanical behavior of reactive powder concrete beams reinforced with steel or GFRP bars [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [13] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构试验方法标准: GB/T50152—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(China Academy of Building Research. Standard for test method of concrete structures: GB/T50152—2012 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.)
- [14] 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.)
- [15] 宋玉普, 韩基刚. 疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 96–100.
(SONG Yupu, HAN Jigang. The failure relationship between different types of steel in beams under fatigue loading [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2012, 44(8): 96–100.)
- [16] YAO Zhixiong. Study on mechanical properties and fatigue life of reactive powder concrete [J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 7: 32–38.
- [17] LI Qiang, YAN Xian, LI Yanyan. Experimental study on fatigue behavior of partially prestressed concrete beams with HRB600 steel bars [J]. Building structure, 2016, 46(2): 8–11, 29.
- [18] 张明, 张庆伟, 景嘉骅. 基于累积残余应变和刚度的钢纤维高强混凝土梁疲劳损伤规律研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(5): 33–37.
(ZHANG Ming, ZHANG Qingwei, JING Jiahua. Study on fatigue cumulative damage of steel fiber reinforced high-strength concrete beams based on cumulative residual compressive strain and rigidity [J]. Sichuan building science, 2017, 43(5): 33–37.)
- [19] WANG Zhaoning. Research on flexural behavior of reactive powder concrete rectangular beam with steel bars [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [20] 王正安. 简支钢筋活性粉末混凝土梁疲劳性能研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.
(WANG Zheng'an. Study on fatigue performance of simply supported reinforced reactive powered concrete beam [D]. Xiangtan: Hu'nan University of Science and Technology, 2014.)