



活性粉末混凝土疲劳后剩余抗压强度试验研究

余自若¹, 安明喆¹, 郑帅泉²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 华锐风电科技(集团)股份有限公司, 北京 100872)

摘要:为研究经受疲劳荷载作用后活性粉末混凝土(RPC)的剩余抗压强度变化规律,对3组共24个RPC圆柱体试件,进行疲劳试验研究。通过静载试验建立RPC抗压强度和谐振频率之间的关系,推算出各疲劳试件的初始抗压强度;在此基础上,对RPC试件进行轴压单级和两级疲劳加载试验,并实测试件在疲劳荷载作用一定次数后的剩余抗压强度。实测结果表明:RPC在单级疲劳后剩余抗压强度的衰减率随循环寿命比的增大而减小,而衰减速率则随着循环寿命比的增大而增大。根据实测值得到RPC单级和两级疲劳加载后剩余抗压强度衰减率与循环寿命比之间关系的拟合公式,计算结果与实测结果吻合良好。

关键词:活性粉末混凝土; 疲劳试验; 疲劳性能; 剩余抗压强度

中图分类号:TU528.572 TU317.1 **文献标志码:**A

Experimental study on residual compressive strength of RPC under fatigue loading

YU Ziruo¹, AN Mingzhe¹, ZHENG Shuaiquan²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Sinovel Wind Co., Ltd, Beijing 100872, China)

Abstract: In order to investigate the evolution law of residual compressive strength for reactive powder concrete (RPC) under fatigue loading, the fatigue tests were carried out. 24 cylinders were cast for testing and divided into 3 groups. By measuring the compressive strength of some RPC specimens, the relationship between initial compressive strength and resonance frequency was established firstly. On that basis, the constant amplitude and two-stage amplitude fatigue tests were carried and the residual compressive strength of RPC specimens were measured after fatigue. Experimental results show that the attenuation of post-fatigue residual compressive strength of RPC decreased with increase of recycle ratio. On the other hand, the attenuation rate increased with increase of recycle ratio. An fitting formula about the attenuation of post-fatigue residual compressive strength and recycle ratio was deduced. The calculated values which come from fitting formula are in good agreement with measured values.

Keywords: reactive powder concrete; fatigue test; fatigue behavior; residual compressive strength

基金项目:国家自然科学基金项目(50778021)。

作者简介:余自若(1980—),女,贵州兴义人,工学博士,讲师。E-mail:zryu@bjtu.edu.cn

收稿日期:2009年9月

0 引言

活性粉末混凝土 (reactive powder concrete, 以下简称 RPC) 是由法国 BOUYGUES 公司的 Richard 等^[1]于 1993 年仿高致密水泥基均匀体系 DSP^[2] (densified system containing homogenously arranged ultra-fine particle) 材料研发出的一种新的高性能、高韧性水泥基复合材料, 由细石英砂、水泥、硅灰等掺合料, 细钢纤维, 高效减水剂, 拌合水等组成。通过提高组分的细度与活性, 使材料内部的缺陷减到最少, 以获得超高强度与高耐久性^[3-5]。目前对 RPC 的应用研究表明^[6-8], 在实际工程中用 RPC 代替普通混凝土, 可有效减少结构构件的截面尺寸与配筋量, 提高其耐久性与安全性。

RPC 以其优异的力学性能拓展了混凝土结构的应用领域, 在土木、核电、市政、海洋等工程及军事设施中都有着广泛的应用前景。而这些领域中的结构物如吊车梁、桥梁、海洋平台、核反应堆安全壳等, 在其服役期间承受较大的重复荷载作用。在疲劳荷载作用下, 材料内部的损伤不断增加, 性能不断恶化, 导致材料抵抗外荷载的能力下降^[9], 所以了解疲劳过程中混凝土剩余强度的衰减规律显得尤为重要。本文对 RPC 圆柱体试件进行单级和两级疲劳加载试验, 测量试件经受疲劳荷载作用后的剩余抗压强度。以试验为基础, 对 RPC 疲劳后剩余抗压强度的衰减率进行研究, 并根据实测值给出 RPC 单级和两级疲劳加载后剩余抗压强度衰减率与循环寿命比之间关系的经验式。

1 试验概况

1.1 试件设计

由于 RPC 抗压强度高, 考虑到试验机的量程, 将试件取为圆柱体 ($\Phi 70 \times 210$), 共制作 24 个相同的圆柱体试件, 根据测试内容不同, 分为 3 组 (以组号 I、II、III 区分), 分别测定试件的初始抗压强度、疲劳寿命 (疲劳加载至破坏时的循环次数) 和疲劳加载后的剩余抗压强度。试件分组情况及试验目的详见表 1。试件以“组号 + 试件号”的形式进行编号, 如“II-4”表示第 II 种加载方案下的第 4 个试件。

RPC 试件制作所用的原材料和配合比见表 2。其中, 水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥; 硅灰粒径在 $2\mu\text{m}$ 以下, 平均粒径为 $0.31\mu\text{m}$ 左右; 高性能减水剂为新型非萘系高性能减水剂 AN-3000; 钢纤维采用特制细圆表面镀铜钢纤维, 直径 0.22mm , 长度 $12 \sim 15\text{mm}$ 。

表 1 试件分组

Table 1 Grouping of specimens

分组编号	试件编号	加载方案	试验目的	试件数量
I	I-1 ~ I-8	静载至破坏	建立 RPC 初始抗压强度与谐振频率的关系	8
II	II-1 ~ II-7	单级疲劳加载至破坏	获得 RPC 的最大应力水平-寿命曲线	7
III	III-1 ~ III-7	单级疲劳加载 后测抗压强度	研究 RPC 疲劳后剩余抗压强度的衰减规律	7
	III-8 ~ III-9	两级疲劳加载 后测抗压强度		2

表 2 RPC 材料配合比

Table 2 Mix proportion design of RPC

水泥/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	硅粉/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	细石英砂/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$			钢纤维/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	高性能 减水剂/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	水/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
		粗	中	细			
708	160	357	714	178	160	74	122

试件采用自制的 5mm 厚高强硬质塑料管模进行立式浇筑, 管模高度为 250mm, 浇筑后将圆柱体上、下两端各截去 20mm, 取中间的相对密实和均匀的区域, 即有效高度 210mm 作为轴压疲劳试件, 保证试件上、下端平行且与纵向轴线垂直。

1.2 试验设备及加载方案

试验对各组试件分别进行了静载抗压试验和轴压疲劳试验 (其中疲劳试验分单级疲劳加载和两级疲劳加载)。静载试验依靠 YA-3000 电子液压式压力试验机进行; 疲劳试验采用 MTS 电液伺服万能疲劳试验机进行, 采用 MTS 作动器对试件施加轴向疲劳荷载。试验中的应变和荷载通过 MEGADAC 5000 数据采集系统进行数据采集。加载装置示意图 1。

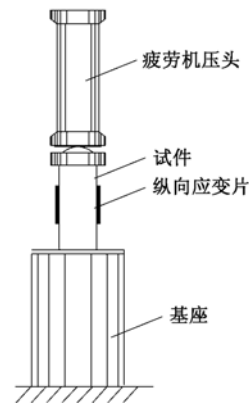


图 1 疲劳试验加载示意

Fig. 1 Loading system of fatigue test

疲劳荷载的加载频率为 3Hz, 加载波形采用正弦波形, 见图 2。其中, 图 2a 为试件 II-1 ~ II-7 和 III-1 ~ III-7 的疲劳加载方案 (不同的是试件 II-1 ~ II-7 疲劳加载至试件破坏, 试件 III-1 ~ III-7 疲劳加载一定次数

后即停机测量剩余抗压强度),图 2b 为试件 III-8 的加载方案(加载幅值由低到高),图 2c 为试件 III-9 的加载方案(加载幅值由高到低)。

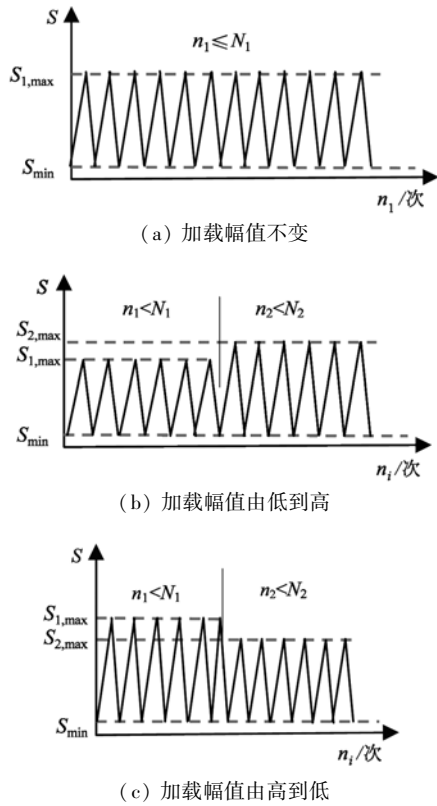


图 2 疲劳试验加载方案

Fig. 2 Load patterns of fatigue tests

图 2 中, $S_{i,max}$ 为第 i 级加载时的最大应力水平,定义为第 i 级加载时的最大应力 $f_{i,max}$ 与 RPC 初始抗压强度 f 之比,试验时 $S_{i,max}$ 控制在 0.7 ~ 0.9 范围内, $f_{i,max}$ 由试验机加载稳定后的实际读数确定; n_i 为第 i 级加载时的实际循环次数; N_i 为第 i 级加载时试件的疲劳寿命。

本文仅研究在疲劳荷载下限保持不变的情况下,改变荷载上限和疲劳循环次数对 RPC 疲劳后剩余强度的影响,故疲劳荷载下限保持为 20kN,由此各试件的最小应力水平 S_{min} 在 0.045 ~ 0.048 之间。

1.3 量测内容

试验主要量测内容如下:①对所有试件量测谐振频率 V ;②对第 I 组试件量测抗压强度;③对第 II 组试件量测疲劳寿命;④对第 III 组量测疲劳循环次数及疲劳后剩余抗压强度。

2 试验结果

2.1 初始强度推算

为了能准确地评定每个 RPC 试件的初始抗压强度,采用无损检测方法反推单个 RPC 试件的初始抗

压强度,在加载试验前先采用动弹模仪测量每个无损试件的谐振频率 V 。根据第 I 组试件的静载抗压强度 f 实测结果,通过 $f = A \cdot V^{3.7}$ 来建立 RPC 的 f 和 V 之间的关系^[10]。在此基础上,对第 II 组试件进行疲劳寿命试验、对第 III 组试件进行疲劳后剩余抗压强度试验。

第 I 组试件的强度和频率实测结果见表 3,回归分析得到材料常数 A 值为 3.298×10^{-11} ,拟合方程(方程的相关系数 $R = 0.9884$)为:

$$f = 3.298 \times 10^{-11} \cdot V^{3.7} \quad (1)$$

表 3 抗压强度实测值与计算值

Table 3 Measured values and calculated values of compressive strength

试件 编号	谐振频率 V/Hz	抗压强度 f/MPa		
		实测值	式(1)计算值	实测值/计算值
I-1	2422	110.30	109.51	1.007
I-2	2443	114.32	113.13	1.011
I-3	2464	116.18	116.73	0.995
I-4	2481	119.13	119.78	0.995
I-5	2518	125.94	126.56	0.996
I-6	2440	112.42	114.32	0.983
I-7	2469	117.42	124.37	0.944
I-8	2508	124.59	118.53	1.051

从表 3 可以看出,试验测得 8 个试件的抗压强度均值为 117.54MPa,标准差为 5.525MPa,说明数据离散性不大,结果可靠。实测值/计算值在 0.944 ~ 1.051 之间,表明利用式(1)得到的抗压强度 f 的计算值与实测值吻合良好,说明用该方法确定试件的初始抗压强度较为准确。故可在不损伤试件的情况下,利用式(1)推算第 II 组和第 III 组各试件的初始强度,具体推算值见表 4 ~ 6。

2.2 试件疲劳寿命推算

表 4 给出了第 II 组试件的实测疲劳寿命 N_1 。表中的 $f_{1,max}$ 为对试件施加的最大疲劳应力,取试验机加载稳定后的实际读数。

表 4 RPC 的疲劳寿命

Table 4 Fatigue life of RPC

试件 编号	f/MPa	$f_{1,max}/\text{MPa}$	$S_{1,max}$	$N_1/\text{次}$	
				实测值	式(2)计算值
II-1	116.73	84.28	0.722	20498	27405
II-2	109.51	80.93	0.739	11092	18308
II-3	113.13	84.17	0.744	15267	16289
II-4	111.79	87.76	0.785	9415	6429
II-5	114.83	99.56	0.867	2959	1149
II-6	112.38	99.23	0.883	612	836
II-7	109.98	102.39	0.931	285	334

根据表 4 中 $S_{1,max}$ 与 N_1 的试验结果,采用幂函数模型 $\lg S_{1,max} = a - b \lg N_1$ (a, b 为材料常数)^[11],给出

圆柱体 RPC 试件的最大应力水平-疲劳寿命拟合关系,即 S_1-N_1 曲线(相关系数 $R = 0.9578$)为:

$$\lg S_{1,\max} = 0.1146 - 0.0577 \lg N_1 \quad (2)$$

相应的 RPC 的 S_1-N_1 拟合曲线如图 3 所示。

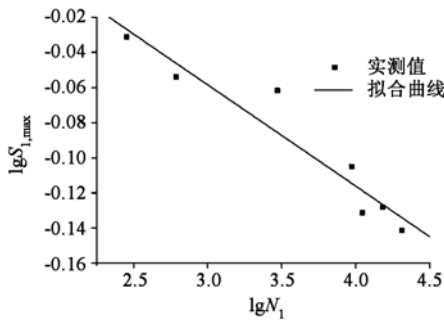


图 3 RPC 的 S_1-N_1 曲线

Fig. 3 S_1-N_1 curve of RPC

从表 4 可以看出,单级加载下试件疲劳寿命 N_1 的计算值与实测值吻合良好,故可将第 II 组试件试验得到的式(2)用于预测第 III 组试件在不同应力水平疲劳荷载作用下的疲劳寿命,具体推算值分别见表 5~6。

2.3 疲劳后剩余抗压强度

表 5 和表 6 列出了第 III 组 RPC 试件在经历过 i 级疲劳荷载作用、但未破坏时的试件剩余抗压强度实测值 f_{ir} 。表中的 $f_{1,\max}$ 和 $f_{2,\max}$ 分别为第一级和第二级加载时,试验机对试件施加的最大疲劳荷载; n_i/N_i 为循环寿命比,即同级荷载加载次数与荷载作用下 RPC 疲劳寿命的比值,试验时 n_i/N_i 控制在 0~1 范围内。

表 5 RPC 单级疲劳后剩余抗压强度

Table 5 Residual compressive strength of RPC after single-stage fatigue loading

试件编号	f / MPa	$f_{1,\max}$ / MPa	$S_{1,\max}$	n_1 /次	N_1 /次	n_1/N_1	f_{ir} /MPa
III-1	117.92	88.44	0.750	10000	14173	0.706	115.32
III-2	110.23	76.17	0.691	26000	59374	0.438	109.10
III-3	122.19	96.77	0.792	5000	5513	0.907	118.25
III-4	116.77	90.96	0.779	6670	7024	0.949	109.79
III-5	118.47	84.71	0.715	4000	32446	0.123	118.29
III-6	113.06	86.49	0.765	10000	100554	0.994	101.02
III-7	112.85	81.36	0.721	15600	28071	0.556	111.42

表 6 RPC 两级疲劳后剩余抗压强度

Table 6 Residual compressive strength of RPC after two-stage fatigue loading

试件编号	f /MPa	$f_{1,\max}$ /MPa	$S_{1,\max}$	$f_{2,\max}$ /MPa	$S_{2,\max}$	n_1 /次	N_1 /次	n_2 /次	N_2 /次	n_1/N_1	n_2/N_2	f_{2r} /MPa
III-8	118.53	83.21	0.702	90.22	0.811	20000	44593	3000	3655	0.449	0.821	109.72
III-9	117.02	96.13	0.771	81.68	0.698	5000	8782	28100	49236	0.569	0.571	106.81

3 RPC 疲劳后剩余抗压强度衰减率

为了描述 RPC 疲劳后剩余抗压强度的衰减规律,定义第 i 级疲劳荷载作用下 RPC 剩余强度的衰减率 C_i [12] 为:

$$C_i = \frac{f_{ir} - f_{i,\max}}{f_{(i-1)r} - f_{i,\max}} \quad (3)$$

3.1 单级疲劳后剩余抗压强度的衰减率

按式(3)的定义,单级疲劳荷载作用下 RPC 剩余抗压强度的衰减率 C_1 为:

$$C_1 = \frac{f_{1r} - f_{1,\max}}{f - f_{1,\max}} \quad (4)$$

根据式(4)可计算出 III-1~III-7 各试件的 C_1 试验值,见表 7。

图 4 为单级疲劳后剩余抗压强度的衰减率 C_1 与循环寿命比 n_1/N_1 的关系。从图中可以看出,RPC 的单级疲劳后剩余抗压强度的衰减率随循环寿命比的增大而减小。

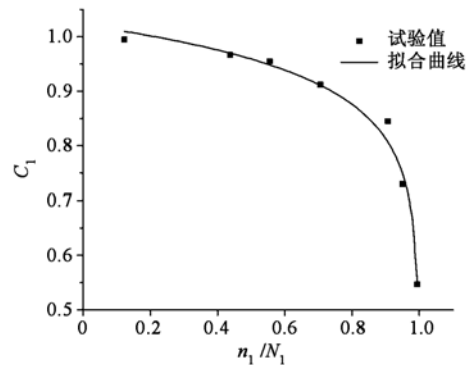


图 4 单级疲劳荷载下的 RPC 剩余强度的衰减率

Fig. 4 Decay rate of residual strength under single-stage fatigue loading

对图 4 上的散点进行拟合,得到 C_1 和 n_1/N_1 的关系式(相关系数 $R = 0.9928$)为:

$$C_1 = 1.022 + 0.091 \ln \left(1 - \frac{n_1}{N_1} \right) \quad (n_1 < N_1) \quad (5)$$

根据式(5)得到的 C_1 计算值见表 7,可以看出计算值与试验值较为接近,试验值/计算值在 0.971~1.049 之间。因此在没有剩余抗压强度实测结果的情况下,可用式(5)直接由循环寿命比 n_1/N_1 求出相

表7 剩余抗压强度的衰减率

Table 7 Reducing rate of residual compressive strength

试件 编号	$f_{1r}/$ MPa	$f/$ MPa	$f_{1,max}/$ MPa	n_1/N_1	C_1		
					试验值	计算值	试验值/ 计算值
Ⅲ-1	115.32	117.92	88.44	0.706	0.912	0.911	1.001
Ⅲ-2	109.10	110.23	76.17	0.438	0.967	0.969	0.998
Ⅲ-3	118.25	122.19	96.77	0.907	0.845	0.806	1.049
Ⅲ-4	109.79	116.77	90.96	0.949	0.729	0.751	0.971
Ⅲ-5	118.29	118.47	84.71	0.123	0.995	1.010	0.985
Ⅲ-6	101.02	113.06	86.49	0.994	0.547	0.556	0.984
Ⅲ-7	111.42	112.85	81.36	0.556	0.955	0.948	1.007

应的剩余抗压强度衰减率 C_1 , 进而按式(4)求得 f_{1r} 。据此可推算两级加载试件Ⅲ-8和Ⅲ-9的 f_{1r} 值, 详见表8。

由式(5)得到RPC的单级疲劳后剩余抗压强度的衰减速率为:

$$C_1' = \frac{dC_1}{d\left(\frac{n_1}{N_1}\right)} = \frac{0.091}{1 - \frac{n_1}{N_1}} \quad (n_1 < N_1) \quad (6)$$

式(6)为 n_1/N_1 的增函数, 可见随着循环寿命比的增加, 衰减速率不断增大。

3.2 两级疲劳后剩余抗压强度的衰减率

按式(3)计算第二级疲劳荷载作用下的剩余强度衰减率 C_2 为:

$$C_2 = \frac{f_{2r} - f_{2,max}}{f_{1r} - f_{2,max}} \quad (7)$$

根据RPC疲劳损伤连续发展的规律^[13]和式(6)可以得到 C_2 相对于第二级循环比 n_2/N_2 的衰减速率应满足以下边界连续条件:

$$\left. \frac{dC_2}{d\left(\frac{n_2}{N_2}\right)} \right|_{n_2=0} = \left. \frac{dC_1}{d\left(\frac{n_1}{N_1}\right)} \right|_{n_1} = \frac{0.091}{1 - \frac{n_1}{N_1}} \quad (8)$$

由此得到:

$$\frac{dC_2}{d\left(\frac{n_2}{N_2}\right)} = \frac{0.091}{\left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right) \times \left(1 - \frac{n_2}{N_2}\right)} \quad (n_2 < N_2) \quad (9)$$

将式(9)积分, 并利用初始条件 $n_2/N_2 = 0$ 时 $C_2 = 1$ 得到:

$$C_2 = 1 + \frac{0.091}{\left(1 - \frac{n_1}{N_1}\right)} \ln\left(1 - \frac{n_2}{N_2}\right) \quad (n_2 < N_2) \quad (10)$$

表8列出了由式(7)确定的 C_2 的试验值与式(10)确定的 C_2 的计算值, 从表中可以看出, C_2 的试验值/计算值分别为1.021和1.057, 说明试验结果与计算结果吻合良好。

表8 C_2 的计算值与试验值比较

Fig. 8 Comparison of calculated value and

试件 编号	n_1/N_1	n_2/N_2	C_1	$f_{1r}/$ MPa	test value of C_2		
					试验值	计算值	试验值/ 计算值
Ⅲ-8	0.449	0.821	0.968	117.39	0.731	0.716	1.021
Ⅲ-9	0.569	0.571	0.945	115.88	0.868	0.821	1.057

4 结论

(1)RPC的疲劳后剩余抗压强度的衰减率随循环寿命比的增大而减小, 衰减速率随着循环寿命比的增大而增大。

(2)根据试验数据得到了RPC疲劳后剩余抗压强度的衰减率拟合公式, 计算结果与试验结果吻合良好。

参 考 文 献

- [1] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concrete research [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1501-1511.
- [2] Cheyrezy M, Maret V, Frouin L. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete) [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7): 1491-1500.
- [3] Bonneau O, Lachemi M. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concrete [J]. ACI Material Journal, 1997, 94(2): 286-290.
- [4] Poiyou A, Bernier G, Chinesta F. Orienting fibers by extrusion in reinforced reactive powder concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(6): 593-598.
- [5] 安明喆, 王庆生, 丁建彤. 活性粉末混凝土的配制原理及应用前景 [J]. 建筑技术, 2001, 32(1): 15-16. (AN Mingzhe, WANG Qingsheng, DING Jiantong. Reactive powder concrete batching principle and application prospective thereof [J]. Architecture Technology, 2001, 32(1): 15-16. (in Chinese))
- [6] 孙伟. 新型结构材料的发展与应用 [C] // 第一届结构工程新进展国际论坛文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 80-118. (SUN Wei. Development and application of new structure and material [C] // Proceedings of 1st International Forum on Advances in Structural Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 80-118. (in Chinese))
- [7] 朱英磊. 活性粉末混凝土的性能研究及应用 [J]. 混凝土, 2000(7): 31-34. (ZHU Yinglei. Research and application on performance of reactive powder concrete [J]. Concrete, 2000(7): 31-34. (in Chinese))

- [8] 张明波. 基于承载力控制的预应力 RPC 梁设计理论研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009. (ZHANG Mingbo. Research of design theory for prestressed RPC girder based on bearing capacity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese))
- [9] 敖波,张定华,赵歆波,等. 多级载荷作用下剩余强度的估算[J]. 机械强度, 2007, 29(3): 463-467. (AO Bo, ZHANG Dinghua, ZHAO Xinbo, et al. Estimation of residual strength under multi-level loads [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(3): 463-467. (in Chinese))
- [10] 鞠杨. 钢纤维(增强)混凝土疲劳损伤行为及其累积损伤理论和疲劳寿命估算方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学, 1995. (JU Yang. A study on fatigue damage behavior and cumulative damage theory and the estimation for fatigue life of steel fibre reinforced concrete [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995. (in Chinese))
- [11] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社, 1986. (Gao Zhentong. Fatigue applied statistics [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 1986. (in Chinese))
- [12] 欧进萍,林燕清. 混凝土疲劳损伤的强度和刚度衰减试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(4): 1-8. (OU Jinping, LIN Yanqing. Experimental study on degradation of ultimate strength and elastic modulus of plain concrete under multi-stage high-cycle fatigue loading [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998, 31(4):1-8. (in Chinese))
- [13] AN Mingzhe, YU Ziruo, SUN Meili, et al. Fatigue properties of RPC under cyclic loads of single-stage and multi-level amplitude[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2010, 25(1): 167-173.