

新型三向预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究

杨 勇¹, 张锦涛^{1,2}, 李亚宁¹, 李 辉¹, 叶 俊¹, 马新堡¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安, 710055; 2. 西安体育中心控股有限公司, 陕西 西安, 710026)

摘要: 为提高钢筋混凝土桥墩的自复位性能和抗震性能, 先对钢筋混凝土桥墩施加竖向预应力, 后采用预应力钢带对桥墩施加横向双向预应力, 形成三向预应力钢筋混凝土桥墩形式. 结合4个三向预应力钢筋混凝土桥墩试件和2个普通钢筋混凝土桥墩对比试件的低周反复加载拟静力试验, 对三向预应力钢筋混凝土桥墩受力机理、自复位性能和抗震性能开展了详细研究, 并着重分析了试件的裂缝发展情况、破坏形态、滞回曲线、骨架曲线、耗能能力、延性和自复位能力. 研究表明, 所提出的新型三向预应力钢筋混凝土桥墩相对普通钢筋混凝土桥墩, 是自复位性能得到明显改善和提高.

关键词: 预应力钢筋混凝土; 桥墩; 三向预应力; 抗震性能; 自复位结构; 试验研究.

中图分类号: TU378.3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0804-08

Experimental study on seismic performance of the three-direction prestressed reinforced concrete bridge piers

YANG Yong¹, ZHANG Jintao^{1,2}, LI Yaning¹, LI Hui¹, YE Jun¹, MA Xinbao¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an, 710055, China;

2. Xi'an Sports Center Holdings LTD., Xi'an, 710026, China)

Abstract: To improve the self-centering ability and seismic performance of reinforced concrete bridge piers, a new kind of three-direction prestressed reinforced concrete bridge pier was created and introduced, in which vertical prestressed steel rod and horizontal two-direction prestressed steel strips were both used to introduce three prestressed stress in the piers. Based on experimental results of four specimens of this new kind of three-direction prestressed reinforced concrete pier specimens and two control common reinforced concrete specimens without any prestressing, the self-centering performance, mechanical performance and seismic performance of the three-direction prestressed reinforced concrete pier were fully studied, which means the development of cracks, failure patterns, hysteretic curves, skeleton curves, energy dissipation, ductility and self-centering ability were mainly analyzed. According to the comparing analysis with that of two reinforced concrete bridge pier control specimens, it was found that the new three-direction prestressed reinforced concrete bridge piers' seismic performance, especially self-centering ability, was obviously improved and made better.

Key words: prestressed reinforced concrete; bridge pier; three-direction prestressed concrete; seismic performance; self-centering structures; experimental study

自复位结构(Self-centering structures, 自复位的概念最早在美国的 PRESSS 研究计划中提出^[1])由于其在地震或在强风后具有较小残余变形, 结构位置和形状基本能恢复到震前或强风前状态, 近年来, 备受工程界和理论界关注, 成为新型抗震结构体系研究热点之一.

钢筋混凝土桥墩, 尤其是西部山区常采用的

高度较大的钢筋混凝土桥墩, 在大震和强风作用下可能产生较大的塑性变形, 灾后桥墩可能产生较大的残余塑性变形, 严重影响桥梁正常使用, 同时也给桥梁结构的灾后修复和加固带来较大困难.

近年来, 国内外开展了采用竖向预应力技术形成自复位钢筋混凝土的试验和理论研究(见

收稿日期: 2016-12-09 修改稿日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578443); 国家重点研发计划(2016YFC0701400); 陕西省科学研究计划项目(2011KJXX42); 西安建筑科技大学创新研究团队项目

第一作者: 杨 勇(1976—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事钢-混凝土组合结构和钢筋混凝土方面的研究教学工作研究.

E-mail: Yyhhp2004@163.com

通讯作者: 张锦涛(1992—), 男, 硕士, 从事部分预制装配式型钢混凝土柱研究. E-mail: zjt52810@163.com

Palermo, Pampanin, 辛克贵, 吕西林等^[2-5]), 以减小钢筋混凝土桥墩的震后残余变形, 已有试验研究表明, 采用竖向预应力的钢筋混凝土桥墩的残余变形确实能得到显著减小, 桥墩尤其是单柱式桥墩的自复位效果显著。

笔者最近几年开展了系列预应力钢带约束混凝土结构的试验和理论研^[6-8], 研究表明, 预应力钢带可以对钢筋混凝土构件提供有效的横向预应力约束, 从而可有效提高钢筋混凝土结构的变形能力和抗震性能。鉴于此, 笔者尝试将预应力钢带横向约束和竖向预应力钢筋混凝土桥墩进行结合, 提出三向预应力钢筋混凝土桥墩新形式, 其主要思路是通过布置竖向预应力筋对钢筋混凝土桥墩施加竖向预应力, 通过安装预应力钢带对桥墩施加横向(环向)预应力, 从而对钢筋混凝土桥墩提供三向预应力作用。

不难看出, 在此三向预应力钢筋混凝土桥墩中, 竖向预应力可以有效减小长高桥墩在较大弯矩作用下产生的受拉裂缝, 同时有效减小试件的残余变形, 提高桥墩的自复位能力和性能; 预应力钢带产生的横向预应力可以有效约束混凝土, 提高混凝土抗压强度和极限变形能力, 从而有效提高桥墩的耗能性能和延性性能, 弥补竖向预应力桥墩在变形耗能方面的不足。所以, 此三向预应力钢筋混凝土桥墩设计思路可以达到既提高良好耗能性能又具有自复位性能的性能特点, 非常适用于地震区的长高钢筋混凝土桥墩, 在西部地区和山区桥梁建设中具有广泛应用前景。

笔者完成了6个1/2比例模型试件, 包含4个

新型三向预应力钢筋混凝土桥墩试件和2个普通钢筋混凝土试件的低周反复拟静力试验研究, 对该新型桥墩的抗震性能和自复位性能进行了对比研究, 在此对部分试验研究结果予以介绍。

1 试验概况

1.1 试件设计

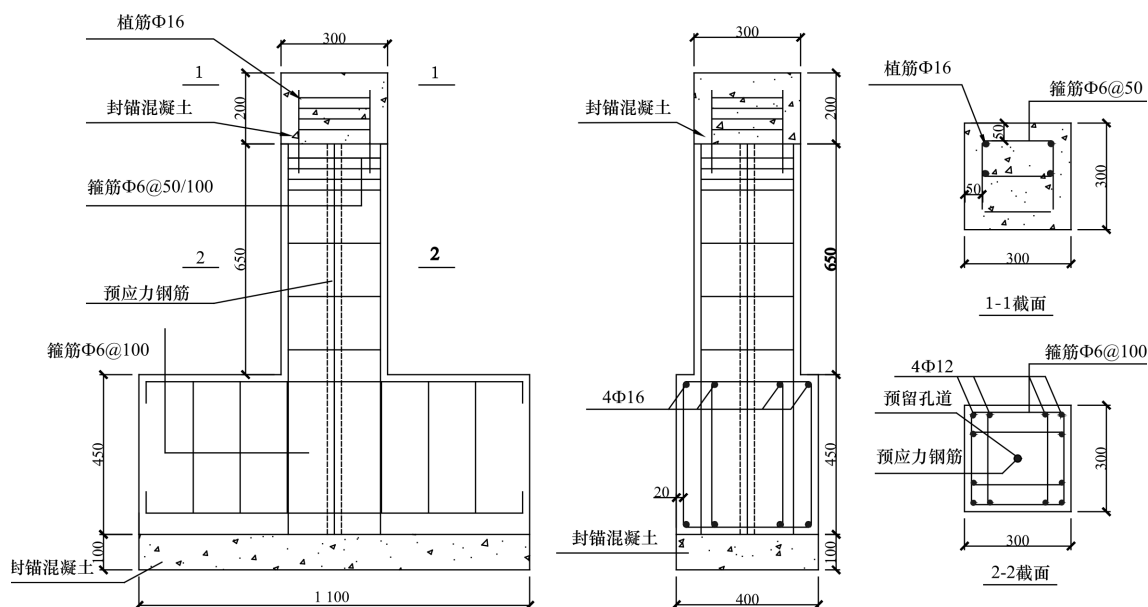
共完成了6个比例为1/2的模型试件的低周反复加载拟静力试验研究, 其中4个试件(PC-1—PC-4)为三向预应力钢筋混凝土桥墩试件, 2个试件(RC-5和RC-6试件)为普通钢筋混凝土桥墩试件。

6个试件分为两批浇筑制作完成。其中试件PC-1、PC-2和试件RC-5的截面尺寸为300 mm×300 mm, 混凝土强度等级为C30, 实测混凝土立方体抗压强度平均值为30.2 MPa。

试件PC-3、PC-4和试件RC-6的截面尺寸为350 mm×350 mm, 混凝土强度等级为C25, 实测混凝土立方体抗压强度平均值为26.8 MPa。

各三向预应力钢筋混凝土桥墩试件中, 竖向预应力筋通过32 mm精扎螺纹钢, 竖向预应力采用后张法进行预应力施加安装。横向预应力通过预应力钢带约束产生, 钢带为宽32 mm、厚0.9 mm的超高强钢带, 按双层100 mm间距紧箍于试件, 形成环向的预应力约束。

各试件截面构造及配筋见图1。试件主要参数详见表1。试件中所采用钢筋、箍筋、钢带等材料的性能参数详见表2。



(a) 试件PC-1、PC-2和PC-5

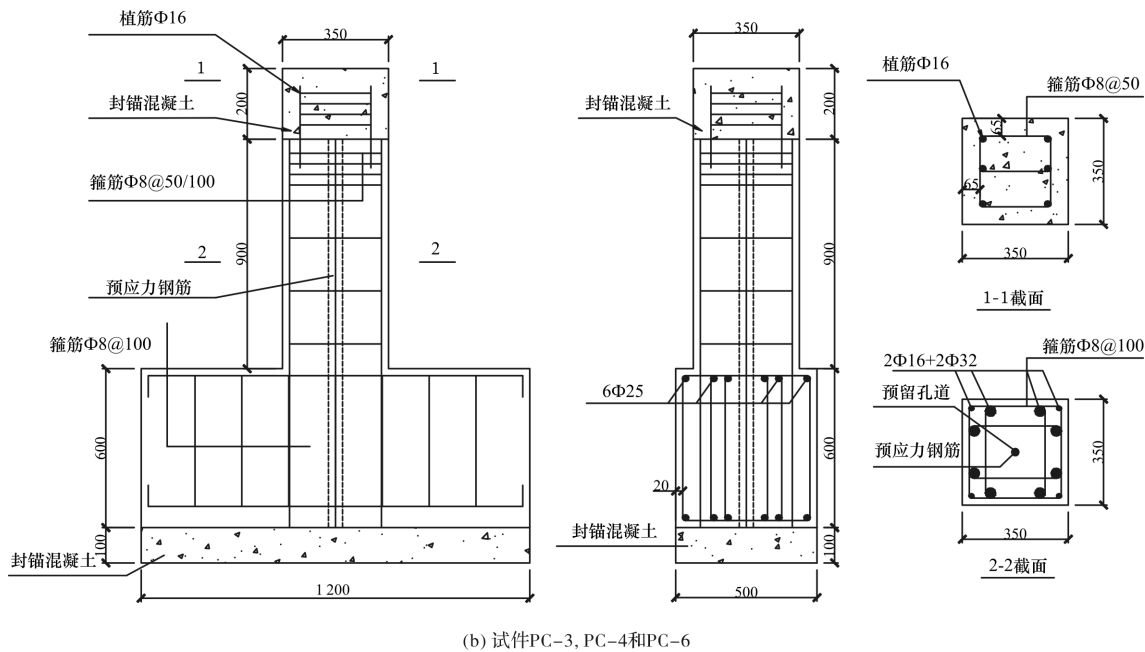


图 1 试件截面构造和配筋示意图(单位: mm)
Fig. 1 The reinforcement and section structure of specimens

表 1 试件主要参数
Tab. 1 Parameters of specimens

编号	截面尺寸/ mm×mm	混凝土强 度/MPa	配筋率 /%	配箍率 /%	剪跨比 λ	轴压比 n	预加轴力设 计值/kN	预加轴力 实测值/kN	预应力 损失/%
PC-1	300×300	30	1.51	0.31	2.67	0.66	550	458	17.7
PC-2	300×300	30	1.51	0.31	2.67	0.66	400	303	24.3
PC-3	300×350	25	3.94	0.67	2.00	0.46	400	310	15.0
PC-4	300×350	25	3.94	0.67	2.00	0.46	550	421	23.5
RC-5	300×300	30	1.51	0.31	2.00	0.66	/	/	/
RC-6	300×350	25	3.94	0.67	2.00	0.46	/	/	/

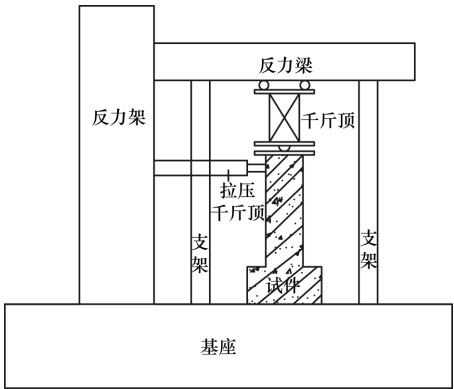
表 2 钢材力学性能
Tab. 2 Mechanical properties of steel

钢材类型	屈服强度 /MPa	极限强度 /MPa	弹性模量 /MPa
Φ32 纵筋	540.00	943.00	190 231
Φ16 纵筋	404.15	695.07	196 262
Φ12 纵筋	397.55	598.54	195 495
Φ8 箍筋	411.22	672.45	191 364
Φ6 箍筋	424.97	668.85	208 500
预应力钢筋	858.00	1 036.00	208 000
钢带	770.00	865.00	186 120

1.2 加载方案

本试验在西安建筑科技大学结构试验室中进行, 加载装置如图 2 所示, 测量数据通过 TDS-602 采集. 本试验采用位移控制加载制度, 试验开始

时, 首先通过 2~3 次分级加载, 将竖向荷载加载到设计值, 再预加水平荷载, 检查设备正常后正式加载. 试件开裂前, 每级位移值循环加载一次, 开裂后, 每级位移值循环加载三次, 到试件丧失竖向承载力或水平荷载下降到水平峰值荷载的 85% 时, 试件加载结束.



(a) 试验加载装置示意图



(b) 试验加载装置实物图

图2 试验加载装置

Fig. 2 Load setup of test

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

以 PC-1 为例,在初始阶段,试件处于弹性阶段,加载和卸载曲线基本是一条直线。试件在没有出现裂缝时,每级位移循环加载一次。水平位移达到 8 mm,距离试件底 250 mm 处出现细微斜裂缝,此级位移开始后每级位移循环加载三次。当水平位移达到 14 mm 时,试件南面距试件底 250~350 mm 处出现竖向斜裂缝部分裂缝贯通,试件根部出现横向裂缝。当水平位移达到 -18 mm 时,试件东面混凝土保护层开始脱落,斜裂缝基本发展成型,试件中竖向裂缝开始发展。当水平位移达到 22 mm 时,试件南北面裂缝加宽,西侧混凝土保护层脱落,并出现横向裂缝,钢带发出吱吱声响。27 mm 时试件底部混凝土压碎,脱落。水平位移达到 32 mm 时裂缝宽度增加并贯通试件发生倾斜。当达到 36 mm 时试件彻底崩溃,此时水平承载力已经下降至峰值荷载的 85%,停止加载。

PC-1 和 PC-2 试件的破坏形态属于弯剪破坏,而 PC-3、PC-4、RC-5 和 RC-6 试件的破坏形态都属于剪切破坏,其破坏形态如图 3 所示。当水平加载位移小于 8 mm 时试件 PC-1 和 PC-2 基本都没有裂缝,8 mm 后裂缝出现,并且发展斜裂缝,这两个试件由于施加预应力的缘故,试件有很好的变形能力;试件 PC-3 和 PC-4 在水平位移加载到 8 mm 后,开始出现裂缝,但是裂缝开始快速发展混凝土大面积破落,试件的变形能力较差,承载力下降迅速;试件 RC-5 和 RC-6 在水平位移小于 8 mm 时裂缝已经大面积发展,试件的变形能力和

承载能力与三向预应力混凝土桥墩相比都比较差。

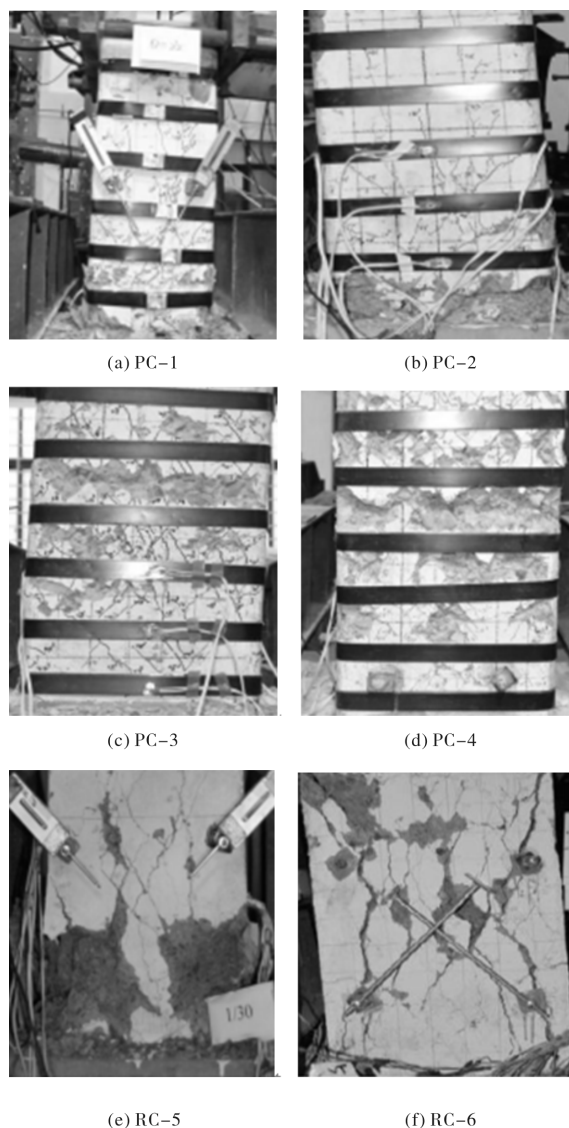


图3 试件破坏形式

Fig. 3 Failure patterns of specimens

2.2 荷载-位移滞回曲线

图 4 为各试件的荷载-位移滞回曲线实测图。从各试件的滞回曲线可以看出,试件在屈服前,处于弹性阶段,荷载-位移滞回曲线在加载、卸载过程中基本上为一条直线,每级水平位移对应的残余应变很小,滞回环面积很小,试件的耗能少;试件屈服后,滞回环的面积增大,试件所消耗的能量增加,同一级别的水平位移三次循环加载过程中第一次加载试件的水平承载力和刚度高于第二次循环加载时的结果,第二次高于第三次。观察到试件 PC-1 和 PC-2 的滞回曲线呈弓形,有轻微的捏缩现象存在,滞回环很饱满,说明试件具有很好的耗能能力和塑性变形的能力。试件 PC-3、PC-4、RC-5 和 RC-6 发生剪切破坏,各试件的滞回曲线呈反 S 形,受滑移影响更加明显,曲线饱

满度也不如其他两个试件,但是塑性变形能力和耗能能力仍能保持较好。

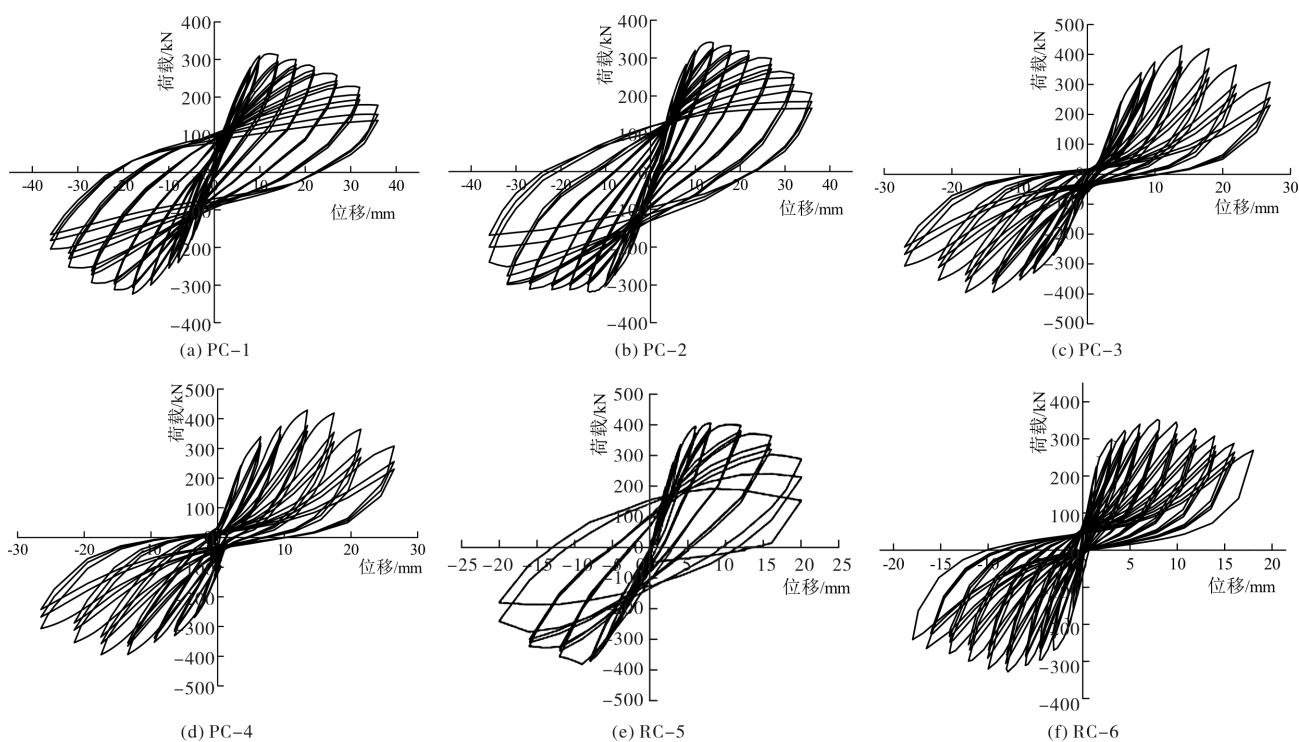


图4 试件滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curves of specimens

2.3 骨架曲线

构件的滞回曲线的包络线即为骨架曲线,如图5为各试件的荷载-位移骨架曲线。

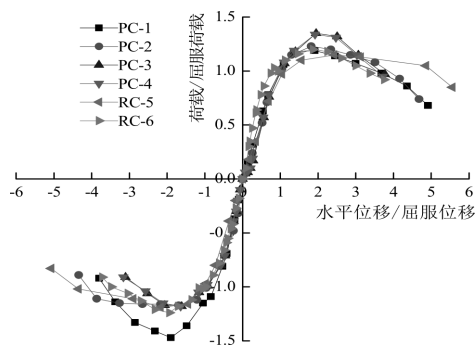


图5 试件骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curve of specimens

由图5中各试件的试件PC-1、PC-2和RC-5骨架曲线可以看出,当试件处于塑性阶段时,普通钢筋混凝土桥墩水平承载力很快就降到峰值荷载85%以下,试件宣告破坏,而三向预应力混凝土桥墩能在变形比较大的情况下仍然保持较高的承载力。由试件PC-3、PC-4和RC-6可以看出三向预应力钢筋混凝土桥墩的受剪承载力比普通钢筋混凝土桥墩提高了15%左右。试件PC-2比试件PC-1抗剪承载力峰值荷载提高9%,PC-3比PC-4提高5%。由此可以得出三向预应力钢筋混凝土桥墩竖向预应力程度越高,承载力则相应地降低,

但下降的幅度不是很大。

2.4 延性分析

延性是指截面或者构件在屈服后到承载力下降为峰值承载力的85%这一阶段的塑性变形能力。一般通过位移延性系数和极限层间相对位移角来衡量结构或者构件的变形能力。本文根据实测的 $P-\Delta$ 滞回曲线的骨架曲线,通过屈服弯矩法确定屈服位移 Δ_y ,以荷载下降到极限荷载的85%时对应的位移为极限位移 Δ_u ,位移延性系数用 μ 来表示, μ 是极限位移 Δ_u 和屈服位移 Δ_y 的比值,即:

$$\mu = \Delta_u / \Delta_y \quad (1)$$

极限层间相对位移转角通过屈服位移 Δ_u 和加载点到试件底的距离 H 的比值来确定,即:

$$\theta = \Delta_u / H \quad (2)$$

从表3可以看出试件PC-1、PC-2、PC-3和PC-4的正向位移延性系数均小于4.0,反向位移延性系数只有PC-2为4.0,其余均小于4.0,延性不好。但是通过各试件的比较可见,各试件的延性差别不大,与普通钢筋混凝土桥墩也比较接近。对比试件PC-1、PC-2和RC-5可知三向预应力混凝土桥墩的延性略低于普通钢筋混凝土桥墩,并且竖向预应力越大程度,其延性越差。但是三向预应力钢筋混凝土桥墩在塑性变形阶段有很强的

保持承载力的能力, 随着水平位移的增加, 其承载力下降的不是很明显. 三向预应力混凝土桥墩的极限侧移角值都于 1/50 满足规范要求, 有良好的变形能力.

表 3 特征点试验结果
Tab. 3 Test results of key points

编号	屈服		峰值		极值		位移延性系数		极限侧移角	
	P_y/kN	Δ_y/mm	P_0/kN	Δ_0/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	$\mu=\Delta_u/\Delta_y$		$\theta=\Delta_u/H$	
PC-1	262.51	7.33	311.52	12.16	264.80	25.74	3.51	3.42	1/31	1/28
	-220.83	-9.48	-323.62	-15.48	-285.08	-31.46	3.32		1/25	
PC-2	277.45	7.69	341.67	13.47	290.42	27.42	3.57	3.79	1/29	1/26
	-269.58	-8.29	-318.85	13.50	-271.02	-33.16	4.00		1/24	
PC-3	318.05	7.15	429.10	11.22	364.73	22.04	3.08	3.14	1/32	1/28
	-335.28	-8.71	-394.47	-13.37	-335.30	-27.90	3.20		1/25	
PC-4	305.67	7.26	410.58	10.75	348.99	23.58	3.25	3.28	1/30	1/27
	-331.22	-8.55	-390.27	-14.23	-331.73	-28.27	3.31		1/25	
RC-5	353.97	2.83	407.09	7.21	346.02	13.05	4.61	4.29	1/46	1/49
	-320.07	-2.76	-380.38	-5.09	-323.32	-11.55	4.18		1/52	
RC-6	292.32	5.33	351.61	9.98	298.87	17.43	3.27	3.16	1/40	1/44
	-264.25	-5.17	-328.11	-10.02	-278.89	-15.72	3.04		1/45	

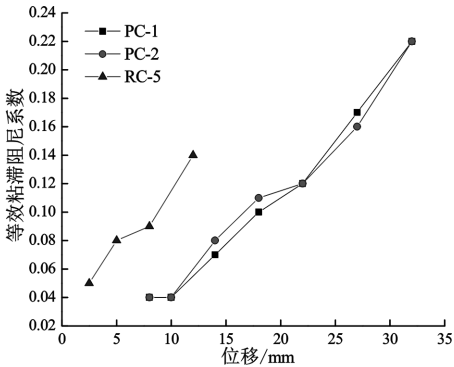
2.5 耗能能力

构件的耗能性能以其荷载-位移曲线的饱满程度来衡量. 但滞回曲线的饱满程度只能定性地分析构件的耗能性能, 所以引入等效粘滞阻尼系数 h_c 来定量地分析其耗能能力, 等效粘滞阻尼系数 h_c 越大, 构件耗能能力越强. 图 6 为各试件的等效粘滞阻尼系数计算结果, 由图 6 可以看出试件 PC-1 和 PC-2 在每级位移下的粘滞阻尼系数相差较小预示三向预应力钢筋混凝土桥墩在弯剪破坏中, 竖向预应力程度对试件的耗能的影响不大, 从图 6 可以看出普通钢筋混凝土桥墩的耗能主要在位移级别为 2~12 mm 之间, 而三向预应力钢筋混凝土桥墩的耗能主要在位移级别为 8~27 mm 之间, 说明三向预应力钢筋混凝土桥墩有更好的变形能力.

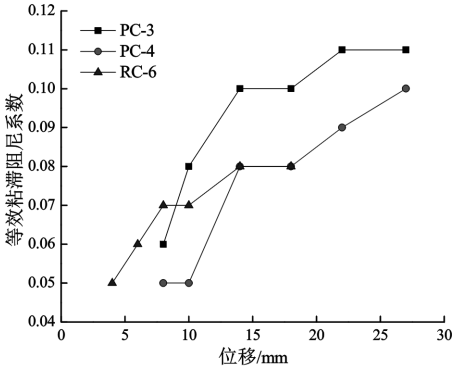
2.5 刚度分析

图 7 为各试件的刚度退化曲线, 从图 7 中可以看到试件 PC-1 和 PC-2 的刚度退化曲线基本趋于重合, 说明竖向预应力程度对三向预应力钢筋混凝土桥墩刚度退化的影响不是很大. 水平位移较小的时候, 试件刚度较大, 随着水平位移的增大, 试件刚度减小. 从图中可以看出来在弹性阶段普通钢筋混凝土桥墩刚度大于三向预应力钢筋混凝土桥墩的刚度; 当试件进入塑性阶段后, 三向预应力钢筋混凝土桥墩的刚度位移曲线较普通混凝土桥墩更加平缓. 对比试件 PC-1、PC-2、PC-3 和

PC-4 的刚度退化曲线可以看出, 竖向预应力程度对试件受剪切破坏和弯曲破坏的刚度影响是不同的. 剪切破坏试件刚度受竖向预应力程度的影响更大些.



(a) 300 mm × 300 mm 截面试件(等效粘滞阻尼系数)



(b) 350 mm × 350 mm 截面试件(等效粘滞阻尼系数)

图 6 试件等效粘滞阻尼系数

Fig. 6 Equivalent viscous damping ration of specimens

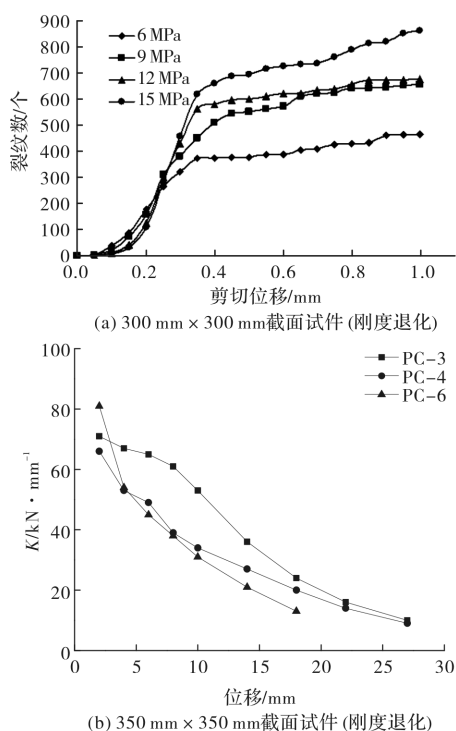


图7 试件刚度退化

Fig. 7 Degradation curves of stiffness

2.6 自复位性能分析

放松约束的结构在地震作用下首先发生一定的弯曲变形,超过一定限值后发生摇摆,通过预应力使结构回复到原有位置,这样的结构称为自复位结构^[9].构件从最大变形状态向初始状态恢复的能力称为复位能力.为描述这种复位能力引入复位能力系数 γ ^[10],各试件的复位能力系数如图8所示.

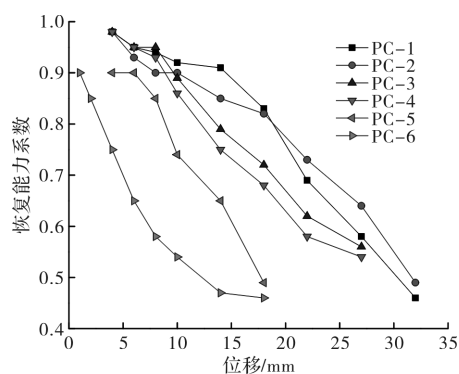


图8 试件复位能力参数(系数)

Fig. 8 Reduction ability ratio of specimens

由图8可以看出,在试件屈服前,试件的残余变形小,复位能力系数基本上都大于0.8,没有明显的变化趋势;试件屈服后,随着水平位移的增大,试件在每级荷载下的残余位移也增大,复位能力系数开始呈下降趋势但是各试件的下降趋势各

不相同.对比试件PC-1、PC-2和RC-5的位移-恢复能力曲线,普通钢筋混凝土桥墩RC-5在各级位移下的恢复能力系数小于三向预应力钢筋混凝土桥墩PC-2和PC-1,同样竖向预应力程度不同的PC-1和PC-2的复位能力系数曲线相差不是很明显.对比试件PC-3、PC-4和RC-6也可以得到相同的结论.故可以得出:在竖向预应力程度相差不大的情况下,三向预应力钢筋混凝土桥墩的复位能力差别不大.

3 结论

(1) 在承载能力、耗能能力、变形能力、刚度退化和强度退化方面,三向预应力混凝土桥墩都优于普通钢筋混凝土桥墩,但三向预应力钢筋混凝土桥墩的延性比普通钢筋混凝土桥墩要略低.

(2) 剪跨比 $\lambda=2.67$, $\lambda=2.00$ 的三向预应力钢筋混凝土桥墩的破坏形式分别为弯剪破坏、剪切破坏.弯剪破坏的桥墩耗能性能和变形能力优于剪切破坏的三向预应力混凝土桥墩,且剪跨比越大,三向预应力混凝土桥墩的复位能力越好.

(3) 三向预应力钢筋混凝土桥墩破坏时,竖向预应力程度增大,承载力减小,延性减小,耗能能力减弱,强度衰减率增大.但复位能力没有明显的区别.

(4) 当竖向预应力钢筋的预应力程度相差150 kN时,竖向预应力程度对三向预应力钢筋混凝土桥墩的抗震性能的影响不是很明显,由此建议如果要确定竖向预应力对三向预应力钢筋混凝土桥墩抗震性能的影响,需要增大竖向预应力程度的差值.

参考文献 References

- [1] PRIESTLEY M J N. Overview of prestress research program [J]. PCI Journal, 1991, 36(4): 50-57.
- [2] PALERMO A, PAMPANIN S, CALVI G. Concept and development of hybrid solutions for seismic resistant Bridge systems [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(6): 899-921.
- [3] 何铭华, 辛克贵, 郭佳. 新型自复位桥梁墩柱节点的局部稳定性研究[J]. 工程力学, 2012, 29(4): 122-127.
HE Minghua, XIN Kegui, GUO Jia. Local stability study of new bridge piers with self-centering joints [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 122-127.

- [4] 郭佳, 辛克贵, 何铭华, 等. 自复位桥梁墩柱结构抗震性能试验研究与分析[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊1): 29-34.
GUO Jia, XIN Kegui, HE Minghua, et al. Experimental study and analysis on the seismic performance of a self-centering bridge pier [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(S1): 29-34.
- [5] 吕西林, 崔晔, 刘兢兢. 自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 19-26.
LÜ Xilin, CUI Ye, LIU Jingjing. Shaking table test of a self-centering reinforced concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 19-26.
- [6] 杨勇, 赵飞, 刘义, 等. 预应力钢带加固钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(3): 45-48.
YANG Yong, ZHAO Fei, LIU Yi, et al. Experimental study on reinforced concrete column retrofitted by prestressed steel strips [J]. Industrial Construction, 2013, 43(3): 45-48.
- [7] 杨勇, 李少语, 刘义, 等. 预应力钢带约束混凝土轴心抗压强度试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 1-5.
YANG Yong, LI Shaoyu, LIU Yi, et al. Experimental study of uniaxial compressive strength of concrete confined by prestressed steel strips [J]. Industrial Construction, 2015, 45(3): 1-5.
- [8] 杨勇, 于云龙, 王欣林, 等. 预应力钢带约束钢管混凝土叠合柱抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 11-15.
YANG Yong, YU Yunlong, WANG Xinlin, et al. Experimental study of seismic performance of composite columns with core steel tube and confined by prestressed steel strips [J]. Industrial Construction, 2015, 45(3): 11-15.
- [9] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1-10.
ZHOU Ying, LÜ Xilin. State of the art on rocking and self-centering structures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1-10.
- [10] 罗海艳. 预应力度对无粘结部分预应力钢筋混凝土柱复位性能的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008: 49-50.
LUO Haiyan. Research on the influence of the degree of prestressed concrete columns[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008: 49-50.
- [11] 李亚宁. 三向预应力钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
LI Yaning. Experimental study on seismic performance of three-direction pre-stressed reinforced concrete columns [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.

(编辑 吴海西)