

活性粉末混凝土柱抗震性能试验

鞠彦忠, 王德弘, 白俊峰

(东北电力大学 建筑工程学院, 132012 吉林)

摘要: 为了考察活性粉末混凝土柱类构件的抗震性能, 开展了 18 根活性粉末混凝土柱的拟静力试验, 研究了轴压比、纵筋配筋率、配箍率和钢纤维体积含量 4 个因素对活性粉末混凝土柱破坏形态、滞回特性、骨架曲线、刚度、承载力及延性的影响规律. 研究表明: 活性粉末混凝土柱的承载力随着轴压比的增大而提高, 但其延性随着轴压比的增大而有下降的趋势; 试件柱的承载力及位移延性系数随着纵筋配筋率的增大而显著增大; 配箍率的提高一定程度上改善了荷载达到峰值后阶段的滞回特性, 骨架曲线的下降段变得较为平缓; 钢纤维掺量的增加, 改善了试件柱的破坏进程, 一定程度上提高了试件柱的延性及耗能能力.

关键词: 活性粉末混凝土柱; 低周反复荷载试验; 抗震性能; 滞回特性

中图分类号: TU528.31; TU317+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)08-0111-06

Seismic performance of reactive powder concrete columns

JU Yanzhong, WANG Dehong, BAI Junfeng

(School of Architecture Engineering, Northeast Dianli University, 132012 Jilin, China)

Abstract: To explore the seismic performance of reactive powder concrete (RPC) column, the quasi-static test of 18 RPC columns are carried out. The factors affecting the column failure patterns, hysteretic characteristics, skeleton curves, rigidity, bearing capacity and ductility were analyzed in this paper, which included axial compression ratio, longitudinal reinforcement ratio, stirrup ratio and steel fiber volume content. The results show that, the bearing capacity of reinforced RPC columns increases, but the ductility decreases with the increase of axial compression ratio. The bearing capacity and displacement ductility coefficient of reinforced RPC columns significantly increases with the increase of longitudinal reinforcement. The stirrup ratio has large influence on the hysteretic behavior of reinforced RPC columns and the skeleton curve flattens out as load exceeds the peak point. The steel fiber volume content has large influence on fracture process of RPC columns, with the increase of steel fiber content, and the ductility of reinforced RPC columns can be improved to a certain extent.

Key words: reactive powder concrete column; low reversed cyclic loading test; seismic performance; hysteretic behavior

活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, 简称 RPC)是一种新型超高强度超高性能的高致密水泥基复合材料. RPC 具有优异的力学性能和耐久性, 其抗压强度可达 200 ~ 800 MPa, 抗弯强度可达 30 ~ 60 MPa, 断裂能达到 40 kJ/m²[1]. RPC

卓越的力学性能可以大大提高结构的抗震性能, 主要表现在以下几方面: 1) 其高强度能够促进结构向轻质化方向发展, 从而使结构所承受的地震惯性力大大降低; 2) 高强度使得构件的截面减小、柔性增大, 变形能力增强, 耗能能力得到提高; 3) RPC 较高的抗剪强度, 对于结构抗震设计比较有利.

近年来国内外从理论研究、性能试验等方面, 都对 RPC 进行了广泛深入地研究, 而且在工程应

收稿日期: 2012-11-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50878040).

作者简介: 鞠彦忠(1963—), 男, 博士, 教授.

通信作者: 鞠彦忠, juyanzhong@126.com.

用方面也取得了一些进展. 目前, 对 PRC 材料的配比和制作方面的研究已经比较成熟, 其基本力学性质已经比较清楚, 梁的承载力方面的研究已经开展^[2-4], 而对于活性粉末混凝土柱类构件的受力性能和抗震性能的研究非常有限, 国外学者^[5-6]对活性粉末混凝土柱的受压性能进行了试验研究, 文献^[7-8]通过有限元软件分析了 RPC 桥墩的受力性能. 文献^[9-10]对 RPC 桥墩试件进行了无轴压的低周反复荷载试验. 目前对于活性粉末混凝土框架柱抗震性能的研究几乎空白. 本文主要针对轴压比、纵筋配筋率、配箍率、钢纤维体积含量 4 个设计因素, 对 18 个活性粉末混凝土配筋柱进行抗震性能对比试验, 旨在探索这些参数对构件破坏形态、滞回特性、延性的影响, 为 RPC 构件的抗震设计及工程应用提供理论和试验依据.

1 试验概况

1.1 试件设计

本试验共设计 18 个试件, 首先通过正交分

析, 考虑轴压比、纵筋配筋率、配箍率及钢纤维体积掺量 4 个分析因子, 每个因子考虑两个水平, 设计 16 个 RPC 配筋柱, 然后根据建筑抗震设计规范^[11]设计了 2 个 RPC 柱用于对比试验. 试件主要参数见表 1. 所有试件均采用统一尺寸, 柱身的尺寸为 200 mm × 200 mm × 1 500 mm. 试验试件截面采用对称配筋, 保护层厚度取 15 mm, 试验柱截面配筋形式见图 1. 活性粉末混凝土立方体抗压强度见表 2, 试件纵筋为 HRB335 热轧钢筋, 箍筋为 HPB235 钢筋, 钢筋的材料性能指标见表 3. 钢纤维为高强钢丝切断型细圆形表面镀铜钢纤维.

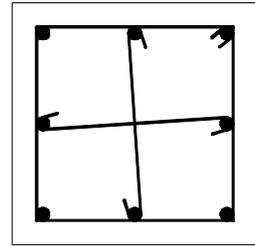


图 1 试件截面配筋

表 1 试件编号和主要参数

试件编号	$b \times h / \text{mm}$	设计轴压比	纵筋配筋率/%	箍筋面积配箍率/%	钢纤维体积掺量/%
C-1	200 × 200	0.29	1.09	0.55	1.0
C-2	200 × 200	0.43	1.09	0.62	1.0
C-3	200 × 200	0.43	1.09	0.55	1.3
C-4	200 × 200	0.43	1.09	0.62	1.3
C-5	200 × 200	0.43	1.09	0.55	1.0
C-6	200 × 200	0.71	2.44	0.62	1.0
C-7	200 × 200	0.58	1.09	0.55	1.3
C-8	200 × 200	0.58	2.44	0.55	1.0
C-9	200 × 200	0.43	1.09	0.62	1.3
C-10	200 × 200	0.43	1.09	0.62	1.0
C-11	200 × 200	0.43	2.44	0.55	1.3
C-12	200 × 200	0.43	2.44	0.62	1.3
C-13	200 × 200	0.58	2.44	0.55	1.0
C-14	200 × 200	0.58	2.44	0.62	1.0
C-15	200 × 200	0.58	2.44	0.55	1.3
C-16	200 × 200	0.58	2.44	0.62	1.3
C-17	200 × 200	0.65	3.32	0.65	1.0
C-18	200 × 200	0.58	3.32	0.65	1.0

表 2 活性粉末混凝土抗压强度

组号	钢纤维体积掺量/%	抗压强度平均值/MPa
RPCS1.0	1.0	119.81
RPCS1.3	1.3	125.43

表 3 钢筋力学性能试验结果

种类	直径/mm	用途	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB335	14.0	纵筋	415.2	577.7
HRB335	12.0	纵筋	382.0	540.6
HPB235	10.0	箍筋	246.1	—
HRB335	8.0	纵筋	370.7	440.3
HPB235	6.5	箍筋	238.7	—

1.2 试验装置与加载方案

试验采用的拟静力加载装置见图 2, 试件采用自主设计的固定台座固定, 柱顶利用 1 000 kN 数控电动液压伺服作动器通过固定的反力架上的横梁施加轴向荷载, 并保持轴向荷载在试验过程中恒定. 水平加载采用悬臂式加载装置, 水平双向往复荷载通过固定在反力墙上的 500 kN 数控电动液压伺服作动器施加. 加载过程中, 柱顶可以随上部滚轴支座水平移动.

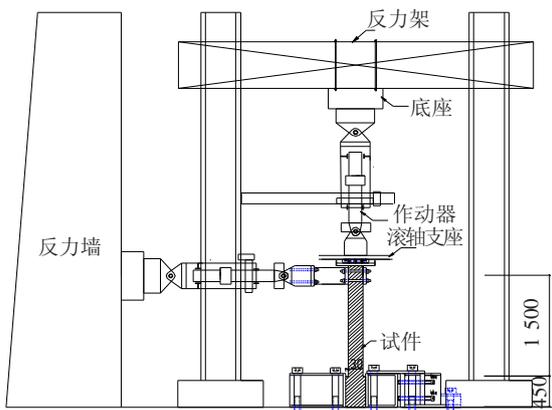


图2 试验加载装置

试验采用荷载、变形混合控制的加载制度。加载初期采用荷载控制的方式,以较小的加载级差逐级加载,每级循环一次,并注意观察试件变化,当试件根部出现裂缝时改用位移控制,此时的位移记为 δ ,以开裂时柱顶位移 δ 为增量加载,每级荷载下反复循环3次,加载至构件承载能力下降到最大承载力的85%时停止试验。



(a) 试件柱裂缝开展



(b) 活性粉末混凝土被压碎和剥落

图3 部分试件破坏形态

试件柱根部纵筋的屈曲发生在第一层箍筋与第二层箍筋之间,屈曲长度为80 mm左右,箍筋之间的纵向钢筋向外突出。由于纵筋的屈曲,失去了对其内部活性粉末混凝土的约束作用,内部混凝土被压碎,发生严重的损伤破坏,活性粉末混凝土的损伤高度范围为100~160 mm。轴压比的变化对试件柱的破坏进程及最终破坏形态有显著影响,随着轴压比的增大,试件开裂裂缝的发展进程加快,活性粉末混凝土损伤高度和深度明显增大。

2.2 荷载-位移滞回曲线

根据数控电液伺服作动器控制采集系统测量得到的数据,去除试件与加载装置间的静摩擦力,得到18个试件柱顶的水平荷载-位移滞回曲线。图4为部分试件的滞回曲线,可以发现活性粉末混凝土柱的滞回曲线有以下几个特点:

2 试验结果与分析

2.1 试件破坏特征与分析

从各试件的破坏过程看,首先在试件柱的受拉侧出现水平裂缝,随着水平荷载的增加,裂缝逐渐延伸发展,柱顶水平位移增加速度明显增大。随着水平荷载的继续增大,在第一条裂缝两侧出现多条较细裂缝,逐渐缓慢地发展直至贯穿整个截面,同时,侧向裂缝向两侧面斜向发展,逐渐贯穿,见图3(a)。由于钢纤维发挥了较好的阻裂作用,使混凝土裂缝的开展比较缓慢,裂缝宽度相对较小,开展路径更多。

当水平加载进入3 δ ~4 δ 位移阶段时,柱角部出现少量活性粉末混凝土的压碎和剥落现象。随着水平加载位移的增加,根部混凝土被压碎(图3(b)),受拉侧混凝土中的部分钢纤维从机体中脱粘拔出,上部混凝土保护层鼓出并成片剥落,露出纵筋和箍筋,试件的水平承载力开始逐渐下降,试件发生延性较好的大偏心受压破坏。

1) 荷载控制阶段加载初期,当柱顶水平荷载较小时,构件几乎没有裂缝出现,试验柱卸载曲线的斜率与初始加载时基本相等,呈现出线性卸载特征。

2) 随着荷载的逐渐增加,活性粉末混凝土柱底部开始出现裂缝,并逐渐发展,滞回曲线的斜率逐渐下降,但斜率下降的速度较为缓慢,即试件柱的刚度有所降低,但降低幅度不大,此时滞回曲线为较小的梭形。柱顶水平荷载继续增加,试件底部产生较多裂缝,并且裂缝宽度明显增大,此时滞回环出现不同程度的捏拢现象,试件滞回曲线均为弓形曲线,且开始向位移轴倾斜,滞回环面积增加较快,表明试件能量耗散加大。

3) 钢筋屈服以后,试件柱的承载力随着试件柱侧向位移逐渐增大仍有一定的提高,但荷载到

达最大值后,试件柱的承载力开始逐渐下降.柱的有效塑性变形能力逐渐减弱;随着侧向位移的逐渐增大,试件柱的刚度逐渐降低,且随加载侧向位移的增大和循环次数的增加更为显著,表现出明显的刚度退化现象.轴压比对试件柱的影响较为显著,轴压比越大,刚度退化越严重.

4) 本试验所有试件柱的破坏形态均为弯曲型破坏,在临近极限状态时的滞回环比较饱满,表明活性粉末混凝土柱具有较好的耗能能力.

5) 滞回曲线“捏缩”效应不明显.滞回曲线的捏缩现象是由于试件的剪切变形、裂缝闭合、纵筋的粘结滑移等因素造成的.与配置光圆钢筋的试件相比,配置带肋钢筋试件的滞回曲线更加丰满,滞回环在零点处捏拢现象不明显,表明带肋钢筋与活性粉末混凝土之间的粘结性能更好,未发生

明显的粘结滑移现象.

6) 试验加载前期,试件柱的滞回曲线在正负两个方向基本上是对称的,而在试验后期,试件柱的滞回曲线出现了不对称现象.这是由于在一个方向的不太大的荷载作用下,对应该侧柱底部的混凝土出现裂缝,当反向加载时,前期出现的裂缝能够闭合;但是,当循环次数较多、水平位移较大时,混凝土裂缝不能闭合,试验柱的弹塑性分布及发展出现明显的不均匀性,而且在两个方向的差异也逐渐增大,尤其是在一个方向荷载作用下,试件柱一侧发生受压破坏或是一侧钢筋被拉断后,在相反方向的荷载作用时,试件的变形性能和承载能力都有较大幅度的降低,使试件的滞回曲线出现了严重的不对称现象.

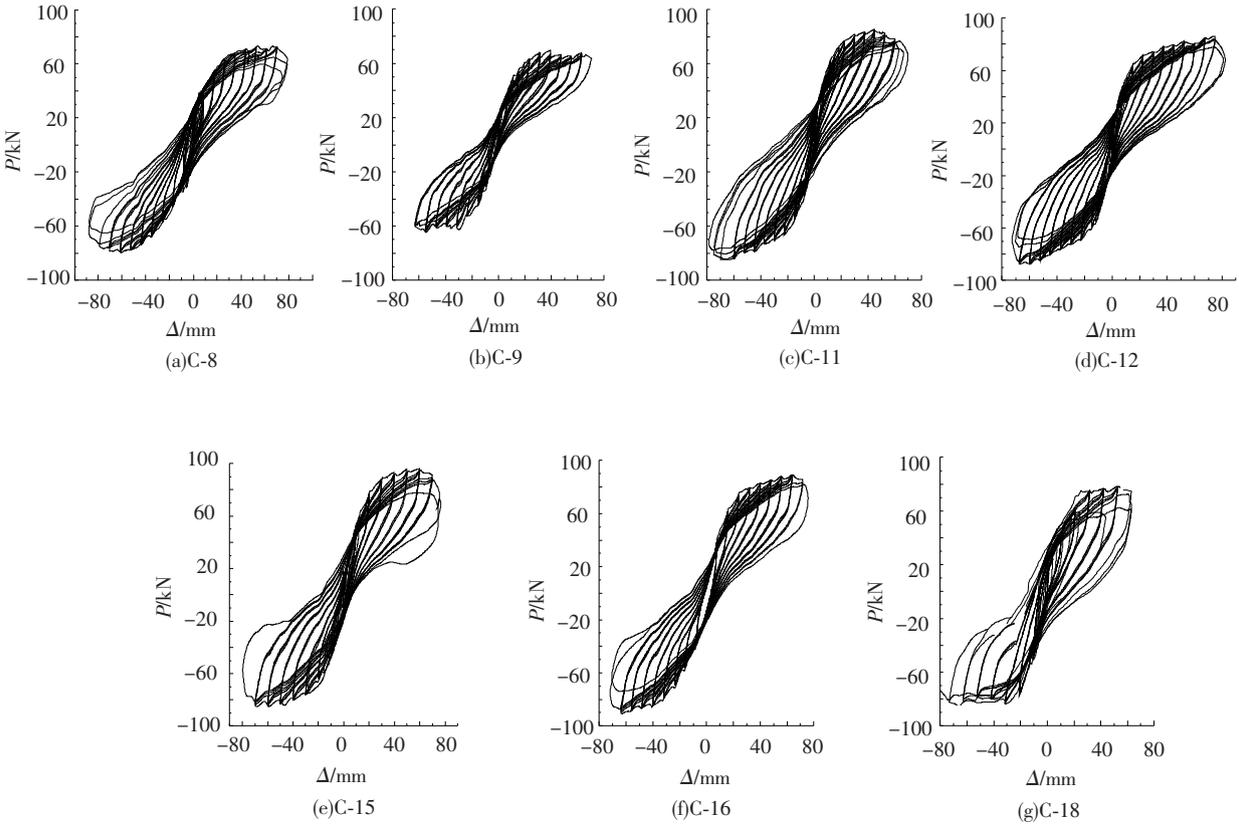


图 4 部分试件的荷载 - 位移滞回曲线

2.3 延性性能分析

延性是指结构超过弹性阶段,在承载能力没有显著下降情况下,结构具备的变形能力.结构延性大小的衡量指标是延性系数.本文以位移延性系数 μ 来衡量构件的延性,定义试件的位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$.其中试件破坏时对应的极限位移 Δ_u 为峰值荷载后荷载下降至最大荷载的 85% 时对应的变形^[12],对应的荷载为极限荷载

$P_u \cdot \Delta_y$ 为屈服位移,采用通用屈服弯矩法^[15] 确定,屈服位移对应的荷载为屈服荷载 P_y ,具体见表 4.

从表 4 的位移延性系数可看出:所有试件均表现出了较好的延性,延性系数均大于 4.9.随着配筋率的提高,试件柱的延性系数逐渐增大,即其延性性能逐渐增大;但随着轴压比的增大,试件柱的延性有下降趋势.

表 4 试件的荷载、位移特征值及延性系数

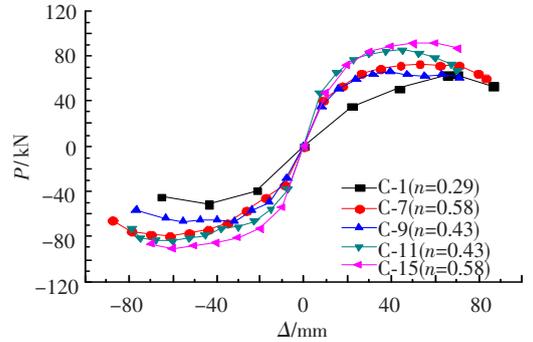
试件编号	P_y/kN	Δ_y/mm	P_u/kN	Δ_u/mm	μ
C-1	31.7	11.67	50.90	68.30	5.85
C-2	39.3	11.73	60.75	58.50	4.99
C-3	42.7	12.38	66.61	62.20	5.03
C-4	46.5	11.33	60.65	67.50	5.96
C-5	43.8	12.93	60.65	67.50	5.22
C-6	58.5	12.68	60.65	67.35	5.31
C-7	51.7	13.80	67.10	71.35	5.17
C-8	55.2	13.20	62.44	85.54	6.48
C-9	42.5	12.83	55.65	67.15	5.24
C-10	44.9	12.15	59.25	73.90	6.08
C-11	53.5	11.18	69.88	74.37	6.66
C-12	55.0	11.25	70.88	71.15	6.32
C-13	48.6	11.93	67.4	77.35	6.49
C-14	57.3	11.48	79.78	71.68	6.25
C-15	59.5	14.63	74.79	76.62	5.24
C-16	49.5	12.08	72.05	77.27	6.40
C-17	56.5	11.70	72.55	58.20	4.97
C-18	52.9	12.54	68.61	72.35	5.77

2.4 参数对活性粉末混凝土柱抗震性能的影响

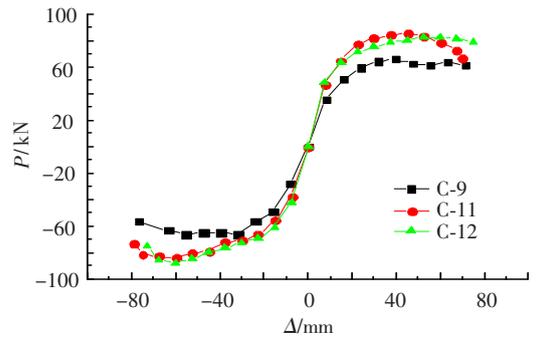
轴压比是影响框架柱的滞回特性、骨架曲线、延性及承载力的重要因素。从图 4 试件滞回曲线的比较可以看出,随着轴压比的增加,试件滞回曲线的捏拢现象趋于明显,滞回曲线变得更加扁平。钢筋屈服后呈现一定程度的强度、刚度退化现象,位移幅值越大,强度和刚度退化越明显。从 3 种不同轴压比下试件的荷载-位移骨架曲线的比较(见图 5(a))可以看出,随着轴压比的增加,试件的开裂荷载和最大荷载均有明显提高,初始刚度增大,极限承载力显著增大,但大轴压比条件下,试件的变形性能变差,最大荷载点左移,即相应的位移变小。当达到峰值荷载后,骨架曲线的下降段逐渐变陡。这说明低轴压比试件的延性要优于轴压比高的试件。

纵筋配筋率及配箍率对试件柱的滞回特性存在明显影响。随着纵筋配筋率及配箍率的提高,试验柱的滞回曲线更加饱满,延性性能及耗能能力均有一定程度提高。从图 5(b)、(c)的骨架曲线可以看出,在相同轴压比条件下,随着纵筋率的提高,试件柱的开裂荷载和相应位移均逐渐增大,并且,纵筋配筋率的提高可以显著提高试件柱的极限承载力;从试件 C-11 与 C-12 的滞回曲线和骨架曲线的比较可以看出,配箍率的提高一定程度上改善了荷载达到峰值后阶段的滞回特性,骨

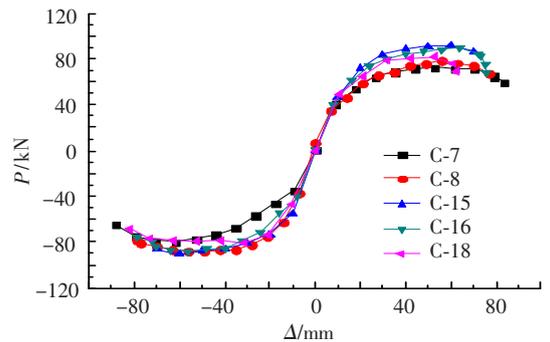
架曲线的下降段明显变得较为平缓;本试验设计的两组活性粉末混凝土配合比中钢纤维含量差别不大,钢纤维体积含量对试验柱滞回特性的影响不明显,但钢纤维体积含量的提高,对试件的开裂荷载有一定的提高,这是因为钢纤维掺量的增加提高了活性粉末混凝土的抗拉强度。



(a) 3 种不同轴压比下试件的骨架曲线



(b) 0.43 轴压比下不同试件的骨架曲线



(c) 0.58 轴压比下不同试件的骨架曲线

图 5 部分试件的骨架曲线

3 结 论

1) 活性粉末混凝土配筋柱在常轴力和水平低周反复荷载作用下,均呈弯曲型破坏。

2) 本试验轴压比范围内,试件柱的承载能力随着轴压比的增大而增大,轴压比越大,试件柱的承载能力越高,但低轴压比试件柱的延性要优于高轴压试件柱;高轴压比试件破坏时塑性区高度

明显高于低轴压比试件。

3) 试件柱的纵筋配筋率及配箍率对其滞回特性存在明显影响,随着纵筋配筋率及配箍率的提高,试验柱的滞回曲线更加饱满,延性性能及耗能能力均有一定程度提高。

4) 纵筋配筋率的提高能够显著提高试件的极限承载力,而配箍率的提高一定程度上改善了荷载达到峰值后阶段的滞回特性,骨架曲线的下降段变得较为平缓。

5) 钢纤维掺量的增加,改善了试件柱的破坏进程,由于钢纤维的阻裂作用,试件裂缝的开展比较缓慢,裂缝宽度相对较小,开展路径更多,一定程度上提高了活性粉末混凝土配筋柱的延性及耗能能力。

参考文献

[1] RICHARD P, CHEYREZY M. Reactive powder concretes with high ductility and 200—800 MPa compressive strength [C]//ACI Spring Convention; SP144—24. San Francisco: American Concrete Institute, 1994: 507—518.

[2] 郑文忠, 李莉, 卢姗姗. 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): 126—134.

[3] 郑文忠, 卢姗姗, 李莉. GFRP 筋活性粉末混凝土梁受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(6): 115—124.

[4] 鞠彦忠, 王德弘, 张超. 活性粉末混凝土的研究与应

用进展[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(5/6): 9—15.

[5] MALIK A, FOSTER S. Carbon fiber-reinforced polymer confined reactive powder concrete columns-experimental investigation [J]. ACI Structural Journal, 2010, 107(3): 263—271.

[6] MALIK A R, FOSTER S J. Behaviour of reactive powder concrete columns without steel ties [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2008, 6(2): 377—386.

[7] 周铁峰, 阎贵平. 活性粉末混凝土预制桥墩的设计研究[J]. 铁道建筑, 2006(1): 6—9.

[8] 许丽娜. 活性粉末混凝土桥墩的地震响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.

[9] 赵冠远, 阎贵平. 活性粉末混凝土柱的抗震性能试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 94—97.

[10] 郝文秀, 钟铁毅. 活性粉末混凝土桥墩延性试验研究与数值分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 82—86.

[11] GB 50011—2002 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[12] JGJ101—96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.

[13] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989.

(编辑 赵丽莹)