

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S1.004

板柱边节点抗震性能研究

黄强¹,付瑞佳²,李林³,傅剑平¹

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室,重庆400045;2. 建研科技股份有限公司,北京100013;
3. 中国建筑西南设计研究院有限公司,成都610041)

摘要:钢筋混凝土板柱结构在水平作用和竖向荷载的共同作用下,节点除了要传递竖向剪力外,还要传递不平衡弯矩,特别是对于板柱边节点,即使不存在水平作用,由于不对称,在自身重力作用下也会产生不平衡弯矩。目前对板柱节点的研究多数集中在内柱节点连接区,边柱节点连接区的研究则很少。本文在板柱边节点中应用一种抗冲切钢筋的新形式,抗冲切锚栓,来研究配置抗冲切钢筋的板柱边节点的抗震性能,共进行了3个在自重和不平衡弯矩共同作用下的板柱边节点试件的试验研究以及有限元分析,得到以下主要结论:配置抗冲切锚栓可以显著提高板柱边节点的承载能力、变形能力以及抗震性能;完成的2个配置抗冲切锚栓的板柱边节点的变形能力满足中国现行规范要求,耗能性能与一般梁柱节点接近,试件达到了中等延性水平。

关键词:板柱边节点,抗冲切锚栓,抗震性能

中图分类号: **文献标志码:** **文章编号:**1674-4764(2013)S1-0013-04

Study on Seismic Behavior of Edge Slab-column Connection

Huang Qiang¹, Fu Ruijia², Li Lin³, Fu Jianping¹

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. CABR Technology Co., Ltd, Beijing 100013, P. R. China; 3. CSWADI Co., Ltd, Chengdu 610041, P. R. China)

Abstract: Under the action of lateral forces and vertical loads, the connection of reinforced concrete slab-column structure will not only transfer significant shear forces, but also unbalanced moment. As to the edge slab-column connection, even if there is no lateral force, it will also transfer unbalanced moment due to the asymmetry. Currently, most tests and studies focus on interior connections, but there are few tests or studies on edge slab-column connections. A relatively new type of shear reinforcement named shear-stud reinforcement was applied in edge column-slab connections and study on the seismic behavior of these connections was conducted. Tests and finite element analysis of three full-scale reinforced concrete edge slab-column connections subjected to gravity and unbalanced moment were completed in this paper, and main conclusions were as following: the bearing capacity, deformation capacity and seismic behavior of connections reinforced with shear-stud reinforcement are improved; deformation of specimens reinforced with shear-stud reinforcement could meet requirements of current codes; the performance of energy dissipating is as good as the common connections, and has reached the medium ductility level.

Key words: edge slab-column connections, shear-stud reinforcement, seismic behavior

板柱结构是由柱和支撑在柱上的不带梁的板所构成的结构。通常在荷载比较小并且跨度也不大的情况下可以采用这种结构形式。采用板柱结构可降低建筑物的总高,降低建筑物的造价,增加经济效益;并且在施工时,模板安置简单,钢筋绑扎方便,可以加快施工进度,因此板柱结构越来越受到人们的青睐。但是在板柱节点的连接区会产生很大的剪应力,板柱连接区容易发生脆性的冲切破坏,甚至引起整个结构的连续倒塌^[1],其次在使用荷载下,板容易在柱子周围产生宽度较大的裂缝,这些裂缝将会导致板柱连接区刚度的进一步降低和板过大的变形;另外,板柱结构的楼板厚度比一般框架或剪力墙结构的楼板都要大,从抗震的角度来考

虑,楼板的自重大,使得本来侧向刚度就比较弱的板柱结构体系更不利。试验研究结果证明,在剪力和不平衡弯矩的共同作用下,板柱连接区可能发生两种破坏形态:弯曲破坏和冲切破坏。板柱连接区具有典型的弯剪扭共同作用的三维受力特点,受力分析非常复杂,到现在为止,国内外对连接区的不同破坏形态和传力机理还没有得到比较一致的认识,计算方法也不是很完善。因此有必要进行更深入的试验研究和理论分析。此外,虽然近年来对混凝土板柱结构已有许多研究,但大多数集中在内柱节点,而忽视了边、角柱节点的研究。因此,本文在总结了国内外试验资料的基础上^[2-12],进行了3个板柱边节点试件的试验研究^[13],其中有两个节点采用

收稿日期:2013-05-20

作者简介:黄强(1987-),男,硕士,主要从事结构工程研究,(E-mail)845535567@qq.com。

了抗冲切螺栓,考察了试件的滞回曲线、裂缝开展情况、各层间位移角下的钢筋应变分布、板柱连接区的破坏过程等内容,并进一步探讨冲切锚栓对板柱连接区的强度、侧向刚度、延性和侧向变形能力的影响,运用通用有限元程序 ABAQUS 对本次试验的三个构件进行模拟,对模拟得到的裂缝分布、钢筋应变和荷载位移曲线与试验值进行了对比分析。

1 原型试件

为叙述方便,用 BZ1、BZ2、BZ3 对此次试验中的构件进行编号。所有 3 个构件的柱截面尺寸、柱子高度、板厚、板的尺寸、板的纵筋的配置情况完全一样,见图 1;试件 BZ2、BZ3 配置的抗冲切螺栓及间距见图 2(a)、(b),螺栓直径为 8 mm,长 110 mm;BZ1 没有配置抗冲切螺栓。各试件配筋见表 1。

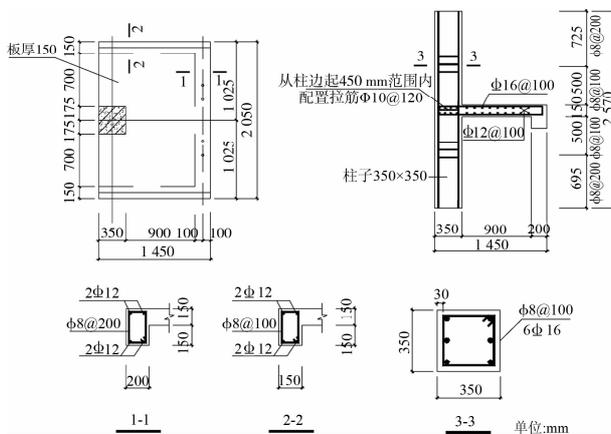


图 1 试件设计详图

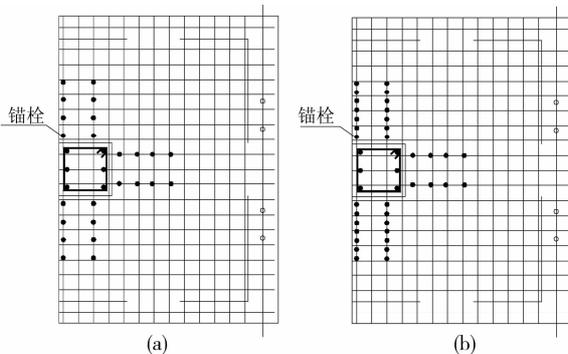


图 2 抗冲切锚栓布置图

表 1 各试件的配筋表

试件编号	板面配筋	柱子纵筋	柱子箍筋	抗冲切钢筋
BZ1	φ16@100 和 12@100	6φ16	φ8@100-200	无
BZ2	φ16@100 和 12@100	6φ16	φ8@100-200	锚栓 φ10@120
BZ5	φ16@100 和 12@100	6φ16	φ8@100-200	锚栓 φ10@60

试验主要研究板柱边节点在自重和水平荷载共同作用下的受力性能。水平力通过作用在板边的作动器施加的竖向力来实现;试验采用逐级对称反复加载的加载制度,并以位移进行控制。试验加载装置图如图 3 所示。试验进行到后期,需要对试件何时失效作出判断,试验采用以下规定:当

试件突然发生冲切破坏或者最大承载力下降到包络线最大值的 85% 以下时,即可终止试验,并认为此时试件发生破坏。

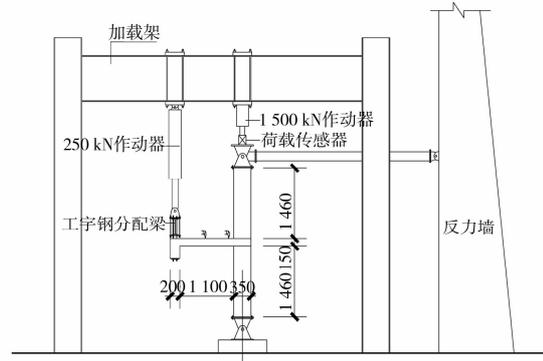


图 3 试验加载装置

2 主要试验结果

2.1 试验现象

3 个构件的试验方法、几何尺寸、板的钢筋分布都一样,因此破坏形态的差异主要是由锚栓的布置引起的。从裂缝的角度看,没有配置锚栓的 BZ1,在板的自由面上的斜裂缝数量少,但是宽度大,而配置了锚栓的 BZ2 和 BZ5 板自由面上的裂缝数量相对较多,裂缝的宽度相对较小。3 个构件相同的是,裂缝都是在柱边附近的板上首先出现裂缝,然后再向外扩展延伸,最终的裂缝模式都是柱两侧边的板面产生斜向的扭转裂缝,柱正面的板面产生大量径向裂缝,围绕柱子存在环向裂缝。从破坏荷载的角度看,配置了较多数量锚栓的 BZ5 的最大受压承载力是 77 kN,最大受拉承载力是 101 kN,配置了较少数量锚栓的 BZ2 的最大受压承载力是 66.7 kN,最大受拉承载力是 90 kN,没有配置锚栓的 BZ1 的最大受压承载力是 64 kN,最大受拉承载力是 81 kN。可见,锚栓的配置明显地提高了构件的承载能力,而且在一定范围内,承载能力随着锚栓配置量的增多而增大。从层间变形能力方面来看,未配置锚栓的 BZ1 到达最大受压承载力时层间位移角是 0.9%,承载力下降至峰值的 85% 时层间位移角是 1.5%;配置较少数量锚栓的 BZ2 到达最大受压承载力是层间位移是 1.2%,承载力下降至峰值的 85% 时层间位移角是 3.9%;配置较多数量锚栓的 BZ5 到达最大受压承载力时层间位移是 1.5%,承载力下降至峰值的 85% 时层间位移角是 4.3%。由此可见,锚栓明显提高了构件的层间变形能力。

2.2 滞回曲线

图 4 给出了 3 个试件的“板边荷载-位移”滞回曲线对比图。从图中不难看出,3 个试件均经历了混凝土开裂前的弹性阶段、承载力达到峰值强度前的非线性阶段以及下降段。3 个试件的滞回曲线都不是很饱满,说明板柱边节点的耗能性能不是很好;另外由图 4 还可知,配置了锚栓的 BZ2 和 BZ5 试件,其承载力和层间变形能力均高于未配置锚栓的 BZ1 试件。

2.3 延性及变形能力

延性是反映结构塑性变形能力、衡量结构抗震性能好坏的重要指标。结构或构件的延性一般采用延性系数来表示,延性系数的定义是结构或构件最大变形与屈服变形的比值,

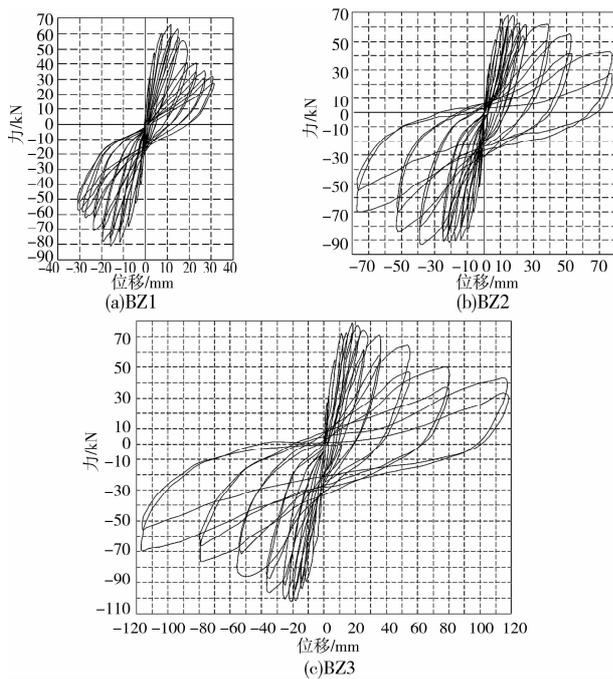


图 4 各试件的 P-Δ 滞回曲线

它可以用位移、转角和曲率的比值来表示,3 个试件的延性评价以位移延性系数作为指标,其中屈服位移的确定参照了 Robert Park^[14] 给出的“基于等效耗能能力”计算模式。3 个试件的延性特征参数见表 2。

表 2 延性特征参数

编号	正向加载			反向加载		
	Δy	Δu	μ	Δy	Δu	μ
BZ1	8.5	17.05	2	9	23.58	2.8
BZ2	11.3	46.21	4	12	64.13	5.3
BZ5	12	44.82	3.7	13	49.14	3.8

从上表可以看出,没有配置锚栓的位移延性系数较小,配置了锚栓的 BZ2 和 BZ5 的位移延性系数则显著提高。

3 有限元分析

采用大型通用商业软件 ABAQUS 进行有限元分析。混凝土本构模型采用考虑了塑性损伤的规范单轴应力-应变模型^[15];钢筋则采用弹塑性加硬化的三折线模型。混凝土与钢筋的粘结滑移则通过延长受拉软化曲线、简单近似考虑钢筋和混凝土之间界面效应的方式予以考虑,认为混凝土开裂后应力并未完全释放,仍有一部分抗拉能力,从而模拟钢筋在混凝土单元裂缝间荷载传递。混凝土部分采用三维实体单元 C3D8R 进行模拟,钢筋则采用三维二节点线性桁架单元 T3D2 来模拟。将程序计算得到的骨架曲线与通过试验获得的骨架曲线进行对比,如图 5 所示。

从上图可以看出,程序计算结果与试验结果在骨架曲线的上升阶段符合得较好;而到了下降段,由于试件产生了较宽裂缝,钢筋与混凝土之间的相对滑移比较严重,程序考虑粘结滑移的方式不能较好地处理该问题,因此两者的下降段曲线有一定的差异。

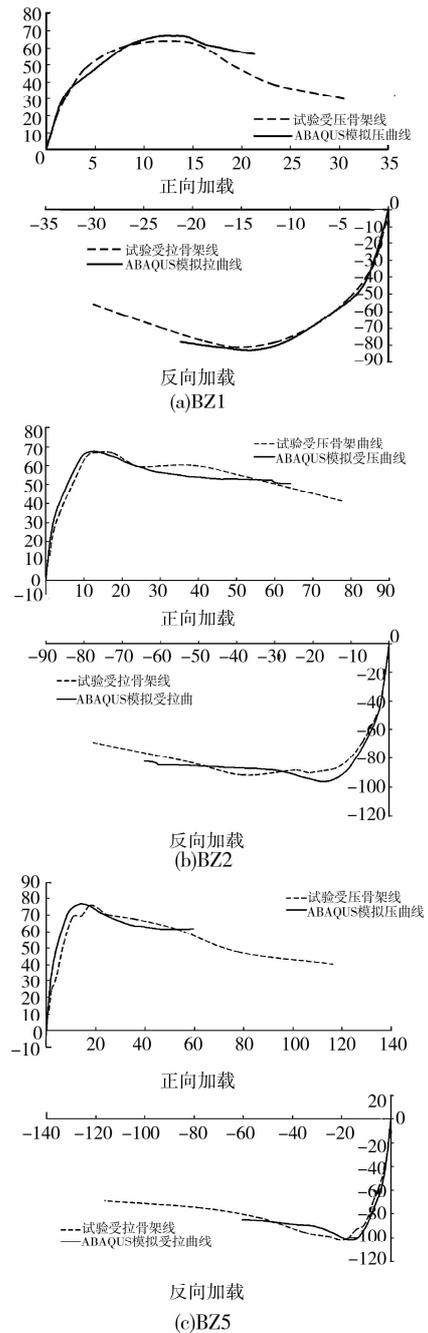


图 5 试验与计算的荷载-位移曲线对比

通过对比程序受拉损伤云图与试件裂缝分布图,发现两者趋势基本一致,即靠近柱子的周围,损伤情况比较严重,该处也是裂缝集中开展的位置;通过对比程序钢筋应变分布图与试验结果发现,靠近柱子的钢筋、锚栓,应变均较大,而远离柱子的钢筋或锚栓,应变则较小。

4 结论

1) 配置抗冲击锚栓,可以显著提高板柱边节点的承载能力、变形能力以及抗震性能,在一定范围内,板柱边节点的承载能力、变形能力和抗震性能随着配置抗冲击锚栓数量的增多而提高。

2) 板柱边节点的自由边靠近柱子处是薄弱部位,该部位很容易产生贯通的交叉斜裂缝,从而降低构件的承载力和抗

震性能,该部位应该采取一定的措施加强。

3)2个配置抗冲切锚栓的板柱边节点达到极限荷载时的最小层间位移角为 $3/200$,满足我国现行规范的限值要求;配置锚栓的两个试件延性为 $3.7\sim 5.3$,达到了中等延性水平。

参考文献:

- [1] Tian Y. The dissertation behavior and modeling of reinforced concrete slab-column connections[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2007.
- [2] 舒兆发. 板柱结构边柱节点的受冲切承载力[J]. 湖南大学学报, 2007, 34(1): 19-23.
- [3] 刘文斑, 黄承逵, 姚谦峰. 混凝土 T 形边柱的板柱连接抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 47-54.
- [4] 代伟明, 刘子华. 板柱节点拟静力试验的层间位移角与剪重比关系[J]. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(2): 39-45.
- [5] 舒兆发. 板柱结构的中柱节点传递剪力和不平衡弯矩的冲切承载力[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(5): 36-41.
- [6] 段洪涛. 钢筋混凝土板柱节点抗震性能的试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [7] 代伟明. 板柱节点抗震性能及设计方法研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2008.
- [8] Tian Y, James O J. Strength evaluation of interior slab-column connections [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(6): 692-700.
- [9] Edward A, Susanto T. Edge-column slab connections under gravity and lateral loading [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 541-551.
- [10] Gerd B, Walter H D. Influence of slab thickness on punching shear strength [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(2): 180-187.
- [11] Tian Y, James O J. Behavior of slab-column connections of existing flat-plate structures [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 561-569.
- [12] Widiyanto, Oguzhan B. Two-way shear strength of slab-column connections: reexamination of ACI 318 Provisions [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 160-170.
- [13] 李林. 板柱边节点抗震性能试验研究及有限元分析[D]. 重庆大学, 2011.
- [14] R. 帕克, T. 波利, 著. 钢筋混凝土结构[M]. 秦文钺等, 译. 重庆: 重庆大学出版社, 1985.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范 GB50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 吕建斌)

(上接第 12 页)

- [6] Jiang M, Qiu W L, Yu B C. Research on seismic response reduction of self-anchored suspension bridge [C]//Proceedings of the International symposium on Computational and Structural Engineering (CSE2009), Shanghai, China, 2009: 209-216.
- [7] Gao Y, Yuan W C, Zhou M, et al. Seismic analysis and design optimization of a self-anchored suspension bridge [C]//Lifeline Earthquake Engineering in a Multi-hazard Environment (TCLEE2009), ASCE, Oakland, California, United States, 2009: 153-164.
- [8] 叶爱君, 管仲国. 桥梁抗震[M]. 2 版, 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [9] JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(编辑 梁远华)