

# 外伸式端板连接钢-混凝土组合节点 裂缝发展规律及破坏模式

陈来稳<sup>1</sup>, 李升才<sup>1</sup>, 王毅恒<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021;

2. 四川理工学院 建筑工程学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:**为研究外伸式端板连接型钢梁-混凝土柱组合节点的受力性能,对7个外伸式端板连接复合焊接环式箍筋混凝土柱-蜂窝钢梁组合节点试件进行了低周反复荷载作用下的拟静力试验.结果表明,外伸式端板连接型钢梁-混凝土柱组合节点裂缝出现时荷载较小;在构件屈服后,在节点区出现主X型交叉斜向剪切裂缝,破坏阶段,节点核心区成通裂状态,部分混凝土压碎鼓出、箍筋屈服、刚度退化、试件破坏,最终破坏模式为节点核心区剪压破坏.通过与课题组其他试验结果对比,外伸式端板螺栓连接型试件耗能增长最快,核心区箍筋、纵筋、混凝土能充分发挥作用,因此外伸式端板螺栓连接型为较合理的节点模式.

**关键词:**外伸式端板;蜂窝钢梁-混凝土柱组合节点;裂缝发展规律;破坏模式;拟静力试验

**中图分类号:**TU398 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.01.017

## Developing rules and destroying patterns of steel-concrete composite joints crack with extended end-plate connections

CHEN Lai-wen<sup>1</sup> LI Sheng-cai<sup>1</sup>, WANG Yi-heng<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Institute of Architecture and Engineering, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:**To research the mechanical property of steel beam and concrete column composite joints with extended end-plate connections, pseudo-static test, low cyclic loading test, was executed on 7 test specimens, all of which were welded compound-ring-hoop concrete column and cellular steel beam composite joints. The experimental results reflected that the load value was smaller when steel beam and concrete column composite joints crack with extended end-plate connections was appearing; after the test specimens yielded, the main X-type crossing incline shear cracks were appearing in areas of joints; when it came to the stage of destroy, continuous seam appeared in areas of joints core, moreover, part of concrete in those areas was crushed and plumped, hoops yielded, stiffness degraded, and test specimens were destroyed; finally, the destroying pattern in aforementioned areas was shear compression failure. Compared with other ex-

收稿日期:2012-03-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50948036);建设部研究开发项目(06-k3-17);厦门市科技计划项目(3502Z20073035)

作者简介:陈来稳(1986—),男,山东省济宁市人,华侨大学硕士研究生,主要研究方向为结构抗震.

通信作者:李升才(1960—),男,辽宁省朝阳市人,华侨大学教授,主要研究方向为结构抗震.

perimental results, the fastest energy-consuming test specimen were those that with extended end-plate bolted connections, hoops, longitudinal bars and concrete in areas of joints core can fully show their functions. As a result, the extended end-plate bolted connection was a comparatively reasonable pattern of joints.

**Key words:** extended end-plate; cellular steel beam and concrete column composite joints; crack developing rule; destroying pattern; pseudo-static test

## 0 引言

1980年代初,在钢结构、钢筋混凝土框架结构及钢骨混凝土(SRC)复合式框架结构的基础上,美国率先开发出了一种新型组合式框架结构体系,即由钢筋混凝土柱与钢梁组成的RCS组合框架结构体系(composite RCS moment frames system)。该结构体系充分利用钢构件及钢筋混凝土构件各自在抗弯或抗压强度、刚度、延性及建筑功能适用性方面的优势,已成功地应用在中、高层建筑尤其是住宅建筑中<sup>[1-2]</sup>。目前国内外对于钢-混凝土组合结构主要集中在钢与混凝土组合梁、型钢混凝土结构、钢管混凝土结构以及外包钢混凝土结构等,而对于蜂窝钢梁与焊接环式箍筋混凝土柱组成的组合结构研究较少。为研究蜂窝钢梁-焊接环式箍筋混凝土柱节点的裂缝发展规律及破坏模式,本文拟对1组(7个)外伸式端板连接的蜂窝钢梁-焊接环式箍筋混凝土柱节点的试件进行低周反复荷载拟静力试验,研究该结构节点试件的性能。

## 1 试验方法

### 1.1 试件设计

根据《建筑抗震试验方法规程》<sup>[3]</sup>,梁柱组合节点试件采用1/2缩尺模型,梁反弯点间距为2.4 m,柱反弯点间距为1.8 m。试件的具体配筋和节点连接构造如图1所示。试件制作方法为先浇筑混凝土柱,养护结束后再将蜂窝钢梁用高强螺栓安装到混凝土柱上。

钢梁为焊接蜂窝工字形梁 H 260 mm × 160 mm × 8 mm × 10 mm,蜂窝梁是将焊接工字钢沿设定的齿槽切割,然后错开,将腹板凸出部分对齐焊接,形成蜂窝状空格的工字钢梁。钢材为 Q345 级钢;蜂窝梁腹板焊接时采用焊透的对接焊缝;螺栓采用 10.9 级螺栓,长为 320 mm。

柱截面为 250 mm × 300 mm,采用高效减水剂配制设计强度等级为 C50 的混凝土。试验纵向钢筋采用 HRB400 级钢筋,箍筋采用密置复合焊接环式

箍筋,选用 HRB335 级钢筋,直径为 10 mm,箍筋间距为 80 mm<sup>[4]</sup>。根据节点处螺栓排列方式的不同,共 7 个试件:8 个直径为 20 mm 的螺栓排成 4 行 2 列(2 个试件);8 个直径为 18 mm 的螺栓排成 4 行 2 列;8 个直径为 18 mm 的螺栓排成 3 行 3 列;8 个直径为 20 mm 的螺栓排成 3 行 3 列;6 个直径为 20 mm 的螺栓排成 3 行 2 列;6 个直径为 22 mm 的螺栓排成 3 行 2 列。编号依次为 RCSJ1—RCSJ7,其螺栓数量、强度以及排列方式如图 2 所示。

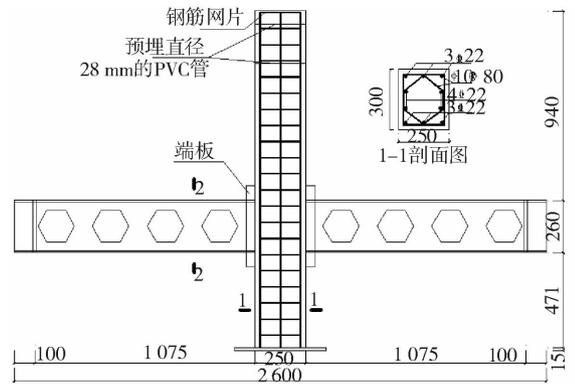


图1 试件几何尺寸及配筋/mm

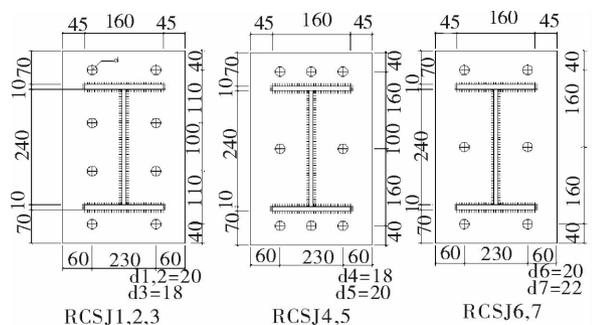


图2 螺栓排列示意图/mm

### 1.2 试验加载装置

为了真实再现组合框架结构受力和变形性能,考虑 P-Δ 效应的影响,水平荷载采用柱端加载方式,采用 MTS 电液伺服加载结构试验机进行低周反复荷载作用下的拟静力加载。竖向荷载通过电动液压千斤顶作用于柱顶,并进行稳压控制,使柱轴力在试验中保持恒定。试验装置示意图如图 3 所示。

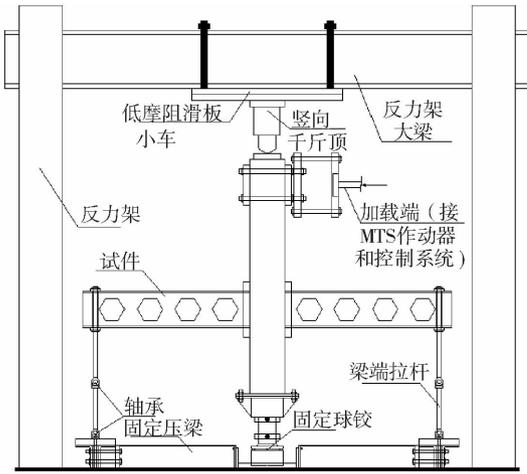


图3 加载装置

### 1.3 加载制度

柱端水平荷载通过控制柱顶水平位移,由 MTS 电液伺服作动器施加。屈服前各位移幅值循环 1 次,屈服后位移幅值采用屈服位移递增,且各幅值下循环 3 次,直至试件承载力降至最大承载力的 85%,停止加载<sup>[5]</sup>,加载制度见图 4。

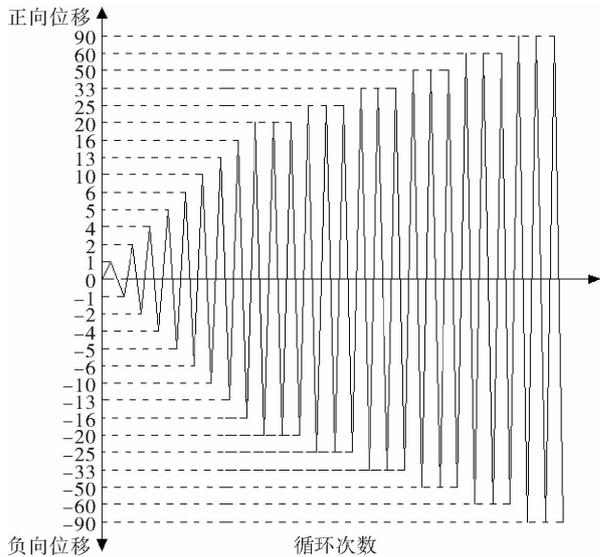


图4 位移控制加载图

结起来表述如下:当加载到极限荷载的 30% 左右时,节点核心区出现第 1 条斜裂缝。随着荷载的来回往复,出现多条平行于对角线方向的斜向交叉裂缝,核心区混凝土在钢梁端板附近只出现少量压碎裂缝。当位移达到 33 mm 左右时,主要斜裂缝开始贯通;随后,裂缝变化情况为主裂缝增宽延伸,只出现少量新裂缝。当位移达到 50 mm 左右时,达到极限荷载,节点核心区混凝土裂缝宽度剧增,出现明显斜向剪切裂缝,在节点核心区还出现了部分混凝土压碎鼓出现象。在 60 ~ 90 mm 的位移循环过程中,节点核心区裂缝宽度扩展至 1 mm,形成贯通交叉主裂缝。核心区正反面混凝土呈通裂状态,节点处箍筋屈服、混凝土保护层剥落、压碎带明显,试件荷载明显下降、刚度退化,钢梁端板附近受压区域混凝土部分被压碎,详见表 1 及图 5。

在试验的加载过程中,裂缝开始沿对角线方向发展,并在 45°方向螺栓的连线方向形成网格,最后发展成十字交叉的主要剪切斜裂缝而发生节点区

表 1 裂缝发展明细表

试件编号	第 1 条裂缝出现时荷载占极限荷载的百分比/%	裂缝贯通时的位移幅值/mm	极限荷载时的位移幅值/mm	节点核心区形成贯通交叉主裂缝时刻的位移幅值/mm
RCSJ1	23	36	60	60 ~ 90
RCSJ2	21	36	60	60 ~ 90
RCSJ3	30	33	50	—
RCSJ4	33	25	50	60 ~ 90
RCSJ5	23	25	50	60 ~ 90
RCSJ6	33	33	50	60 ~ 90
RCSJ7	31	33	50	60 ~ 90

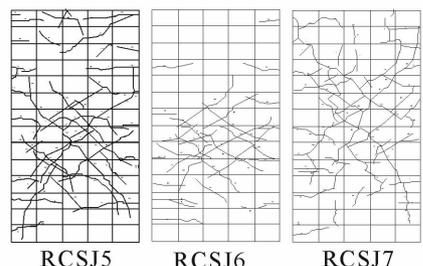
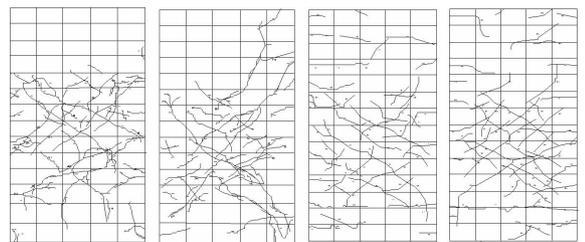


图5 试件破坏形态

## 2 试验结果与分析

### 2.1 裂缝发展

经过观察发现,虽然试验用来连接钢梁与混凝土柱的螺栓数目和排列方式不同,但是所有的构件在裂缝发展方面存在相似之处(除了 RCSJ3 试件在位移幅值达到 50 mm 时,节点处上部用于固定的高强螺栓螺母弹出,考虑到安全问题,试验结束),归

的剪切破坏.同时,在钢梁端板附近混凝土柱的受压区域同时发生压碎破坏.在整个试验加载过程中,节点区上下两端出现少量水平裂缝,其相互间隔大约在5 cm左右,出现时间在试验前中期,在中后期略有延伸扩展并有闭合的趋势.对于不同的螺栓排列方式,RCSJ4—RCSJ7试件的裂缝发展较为相似,有比较明显的斜向裂缝网格出现;RCSJ1—RCSJ3节点核心区在中部2行螺栓连线方向出现斜裂缝,使网格不明显.

## 2.2 破坏模式

在诸多RCS组合节点试件的试验中,比较有代表性的是R. Kanno等<sup>[6-7]</sup>于1993年在美国Cornell大学所做的RCS组合节点不同破坏模式的强度、位移及其抗震性能的试验,而后于1996年对11组大比例尺寸的不同组合节点试件进行了5种基本破坏模式的反复荷载试验,以研究RCS组合试件的基本破坏模式.本次试验的试件破坏模式为5种基本破坏中的梁柱节点破坏,即节点区域的剪切破坏,这是由于节点区域内箍筋屈服,导致节点混凝土剪切破坏.节点破坏模式如图6所示.本次试验的试件,相比于4行2列的RCSJ1—RCSJ3和3行2列的RCSJ6,RCSJ7,3行3列螺栓的RCSJ4,RCSJ5的极限承载力更高.相同的螺栓排列方式下,半径大的试件承载力更高.

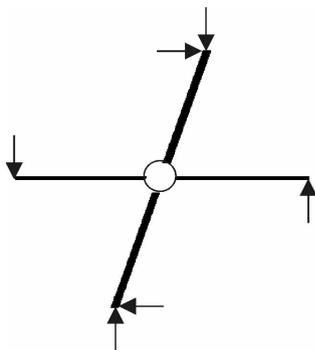


图6 节点破坏模式示意图

## 3 结论

通过对焊接复合箍筋柱蜂窝梁组合节点开裂过程及裂缝发展规律的试验观测及分析,可得到以下结论:1)试验中出现螺帽脱出现象的RCSJ1构件,经分析主要原因是试验所用螺杆太短、太细.2)由于外伸式端板的约束作用,在端板连接的4角处初裂位移和初裂荷载都较小.3)破坏阶段,在位移为90 mm的循环中,节点核心区成裂通状态,部分混凝土压碎鼓出,箍筋屈服,刚度退化,试件破坏,最终破坏模式为节点核心区剪压破坏.4)节点处的外伸式端板和穿过节点区域的螺栓对于裂缝发展有一定的限制作用.5)通过对比本次试验的7个试件的裂缝发展和破坏,节点处3行3列的螺栓排列方式是最为合理的,而对于相同排列方式,螺栓直径大的试件承载力更高.6)通过与课题组其他试验结果对比,外伸式端板螺栓连接型试件耗能增长最快,核心区箍筋、纵筋、混凝土能充分发挥作用,因此外伸式端板螺栓连接型是较合理的节点模式.

## 参考文献:

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构:原理与实例[M]. 北京:科学出版社,2009.
- [2] 聂建国,陶慕轩. 钢-混凝土组合结构体系研究新进展[J]. 建筑结构学报,2010,31(6):71.
- [3] JGJ 101-96,建筑抗震试验方法规程[S].
- [4] 庄云.SRC柱—RC梁组合件抗震性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2007.
- [5] 李升才,颜军. 混凝土柱-蜂窝钢梁组合节点拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(2):30.
- [6] Kanno R. Strength deformation and seismic resistance of joints between steel beams and reinf-concrete columns [D]. Cornell University,1993:617.
- [7] Kanno R, Deierlein G G. Seismic behavior of composite (RCS) beam-column joint subassemblies [C]//Composite Construction in Steel and Concrete III, Shahrooz: ASCE, 1996:236-249.