

# 外伸式端板连接型钢-混凝土 组合节点合理螺栓布置研究

陈杰, 李升才

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:**对7个高强螺栓外伸式端板连接的蜂窝钢梁-复合焊接环式箍筋混凝土柱组合节点试件进行低周反复加载试验,分析组合节点在模拟地震作用下的破坏形态和抗震性能,研究地震作用下组合节点合理螺栓布置形式,结果表明:相同的螺栓布置形式,螺栓直径大的其抗震受剪承载力高;不同的螺栓布置形式,螺栓尽量靠近梁翼缘的布置形式(3行3列)的节点是外伸式端板连接型钢-混凝土组合节点更为合理的节点形式。

**关键词:**外伸式端板连接;蜂窝钢梁;焊接环式箍筋;螺栓布置;组合节点;抗震性能

**中图分类号:**TU398.9 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2013.02.003

## Research on the reasonable arrangement for bolts in steel-concrete composite joint of extended end-plate connection

CHEN Jie, LI Sheng-cai

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The low frequency cyclic loading tests on 7 composite joints specimens of cellular steel beam and welded compound-ring-hooped concrete column connected by extended end-plate with high-strength bolts were carried out to investigate the failure mode and seismic behavior of composite joints under simulated seismic action, intends to put forward a reasonable bolts arrangement in composite joints under seismic action. On the basis of test observation and analysis results, the conclusion can be drawn that with the same arrangement of bolts, the greater the bolt diameter is, the higher its seismic and shear capability would be; Among different types of arrangement for bolts, joints in which the bolts are arranged as close as possible to the beam flange (three rows and three columns) are the more reasonable ones among steel-concrete composite joints of extended end-plate connection.

**Key words:** extended end-plate connection; cellular steel beam; welded ring-hoop; bolts arrangement; composite joint; seismic behavior

收稿日期:2012-10-16

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);福建省科技计划重点项目(2012H0028)

作者简介:陈杰(1986—),男,福建省南平市人,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。

## 0 引言

蜂窝钢梁-复合焊接环式箍筋混凝土柱框架体系兼备传统的钢结构框架体系和钢筋混凝土框架体系的优点. 蜂窝钢梁重量轻、用钢量少,可以提供较大的跨度,同时具有较好的延性和耗能能力<sup>[1-2]</sup>;另外,复合焊接环式箍筋约束的高强混凝土柱与钢管混凝土柱有着类似的受力性能<sup>[3]</sup>,但比钢管混凝土柱要经济得多,并且克服了钢管混凝土柱易锈蚀和抗火性能差等缺点. 该结构受力合理,可充分发挥钢材及混凝土2种材料的作用<sup>[4]</sup>.

为了在保证优良的抗震性能的同时改善可施工性,采用高强螺栓外伸式端板连接,这样的节点无需现场焊接,可排除焊接连接可能带来的问题<sup>[5-6]</sup>. 因此,本文拟对7个高强螺栓外伸式端板连接的蜂窝钢梁-复合焊接环式箍筋混凝土柱组合节点的不同形式进行低周反复荷载拟静力试验,以研究其抗震性能,从而得到合理的螺栓布置形式.

## 1 试验设计

### 1.1 模型设计

本试验试件采用1/2比例缩尺模型<sup>[7]</sup>. 梁截面尺寸为160 mm × 260 mm × 8 mm × 10 mm,采用Q345级钢. 柱截面尺寸为300 mm × 250 mm,混凝土采用C50强度等级. 连接端板厚度为45 mm,螺栓采用10.9级螺栓. 整个试件几何尺寸及配筋图如图1所示.

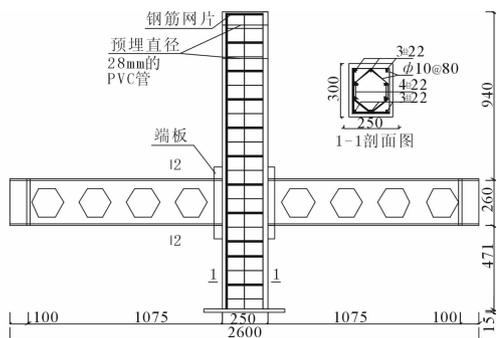


图1 试件几何尺寸及配筋图/mm

试件取自常规多层多跨框架结构侧向荷载作用下相邻梁柱反弯点之间的典型单元. 梁反弯点之间距离为2.4 m,柱反弯点之间距离为1.8 m. 试件分为3组,编号为RCSJ1—RCSJ7. 其中RCSJ1, RCSJ2, RCSJ3为8个螺栓排成4行2列,螺栓直径分别为20 mm,20 mm,18 mm(RCSJ1, RCSJ2为本课

题组曾做过的2个试件);RCSJ4, RCSJ5为8个螺栓排成3行3列,螺栓直径分别为18 mm,20 mm;RCSJ6, RCSJ7为6个螺栓排成3行2列,螺栓直径分别为20 mm,22 mm. 它们的布置形式如图2所示.

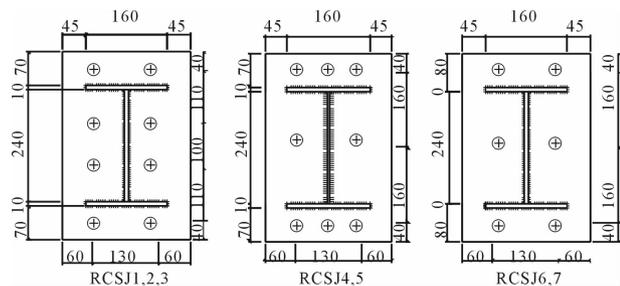


图2 螺栓布置形式图/mm

### 1.2 加载设计

为了反映框架梁柱组合件受地震荷载作用时的实际受力特征,考虑P-Δ效应的影响,水平荷载采用的是柱端加载方式. 柱端水平力由MTS电液伺服加载系统施加,整个加载过程采用位移控制.

竖向荷载由电动液压千斤顶通过超高压稳压油泵作用于柱顶(试验前预加500 kN预定轴向力),以保证柱轴力在试验中恒定不变,且在水平加载时可随上部低摩擦滑动小车水平移动. 竖向千斤顶前端球铰允许柱顶与柱底的转动,节点两侧梁端通过上下设有轴承的拉杆与底部压梁连接,形成可水平移动的铰接支承,以模拟组合节点边界条件. 整个加载装置如图3所示.

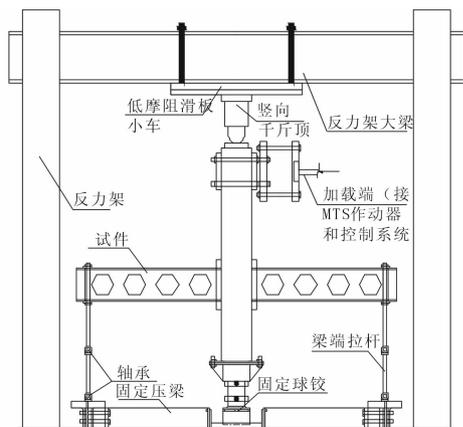


图3 试验加载装置示意图

水平荷载采用低周反复循环荷载,加载制度如图4所示. 试件屈服前各位移幅值循环1次;试件屈服后,在各幅值下循环3次,直至试件承载力降至最大承载力的85%后停止加载.

### 1.3 测量设计

该试验主要测量内容包括:1)采用 MTS 高精度拉索电子位移计(精度为 1%)测量组合件的侧移;2)采用电子位移计测量柱顶水平力作用点的侧向位移和柱底可能发生的位移;3)采用导杆引伸仪测量塑性铰区域的弯曲变形、纵向钢筋在节点区的滑移和节点核心区的剪切变形;4)采用电阻应变片和应变花分别测量纵筋、箍筋、钢梁顶部、钢梁腹板和钢梁核心区腹板的应变。

所有荷载、位移和应变信号均通过 MTS—GT 控制器自动采集。

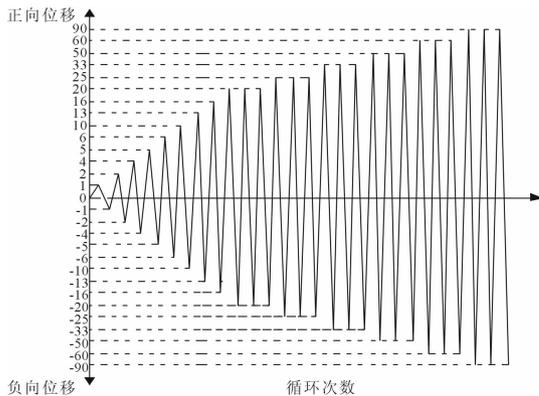


图4 加载制度示意图

## 2 试验结果分析

### 2.1 试件的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载统计以及延性系数统计

试件 RCSJ1—RCSJ7 的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载以及延性系数的实测值见表 1。

表1 试件的开裂荷载、屈服荷载、极限荷载和延性系数

试件编号	开裂荷载/kN	屈服荷载/kN	极限荷载/kN	延性系数 $\beta$
RCSJ1	34.0	105.1	141.3	3.05
RCSJ2	35.0	133.1	170.7	2.75
RCSJ3	45.4	112.5	150.0	2.62
RCSJ4	58.6	131.4	175.4	2.48
RCSJ5	41.3	135.9	180.7	2.48
RCSJ6	44.4	111.9	144.3	2.23
RCSJ7	52.4	126.5	156.5	2.39

由表 1 可以看出:相同的螺栓布置形式,RCSJ1 和 RCSJ2 与 RCSJ3 相比,RCSJ4 与 RCSJ5 相比,RCSJ6 与 RCSJ7 相比,螺栓直径大的承载力高,延性

好;不同的螺栓布置形式,RCSJ5 承载力最高,RCSJ1 延性最好,而 RCSJ6 承载能力最低,延性最差.由此可得,3 行 3 列的螺栓布置形式承载能力最高,4 行 2 列的螺栓布置形式延性最好。

### 2.2 滞回曲线分析

在反复荷载作用下,每次加载、卸载和在反方向加载、卸载过程中,荷载和该构件的变形会形成一个滞回环,在多次循环加载的情况下,会产生一系列的滞回环,称为滞回曲线.本文滞回曲线是以荷载为 Y 轴,以位移幅值为 X 轴做出的图形.图中所包围曲线的面积反映了在反复荷载作用下构件通过塑性变形对外输出能量的消耗.各试件的滞回曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出:当位移幅值在 20 mm 以下时,各试件的滞回曲线包围的面积积极小,力和位移基本成直线状态,几乎不产生塑性变形,结构基本处于弹性工作状态;随着荷载的增加,试件均进入弹塑性阶段,荷载—位移曲线呈非线性,产生较明显的塑性变形,滞回曲线逐渐向位移轴靠拢,滞回曲线包围的面积逐渐增大,卸载后存在一定的残余变形,但无明显的屈服点;达到屈服荷载后,其承载力下降较快,表现出明显的刚度退化现象.由于节点核心区混凝土的开裂及钢筋的粘结滑移,试件均出现捏缩现象。

7 个试件的滞回曲线中,相同的螺栓布置形式,RCSJ1 和 RCSJ2 与 RCSJ3 相比,RCSJ4 与 RCSJ5 相比,RCSJ6 与 RCSJ7 相比,螺栓直径大的承载能力高,抗震性能好;不同的螺栓布置形式,RCSJ5 承载能力最高,而 RCSJ6 承载能力最低,说明 3 行 3 列的螺栓布置形式抗震性能最好。

### 2.3 耗能性能分析

本试验节点模型采用等效黏性阻尼系数  $h_e$  来表示耗能能力<sup>[8]</sup>, $h_e = A / (2\pi P_0 \Delta_0)$ ,其中 A 为滞回环面积/ $\text{mm}^2$ , $P_0$  为滞回环顶点的荷载/kN, $\Delta_0$  为滞回环顶点的位移值/mm.各试件在不同加载阶段的等效黏性阻尼系数  $h_e$  如图 6 所示。

由图 6 可以看出:相同的螺栓布置形式,RCSJ1 和 RCSJ2 与 RCSJ3 相比,RCSJ4 与 RCSJ5 相比,RCSJ6 与 RCSJ7 相比,螺栓直径大的耗能性能好;不同的螺栓布置形式,RCSJ1 耗能性能最高,而 RCSJ6 耗能性能最低,说明 4 行 2 列的螺栓布置形式耗能性能最好,3 行 3 列的螺栓布置形式次之。

### 2.4 刚度退化特性分析

通常节点的刚度越大,刚度降低率越小,滞回曲

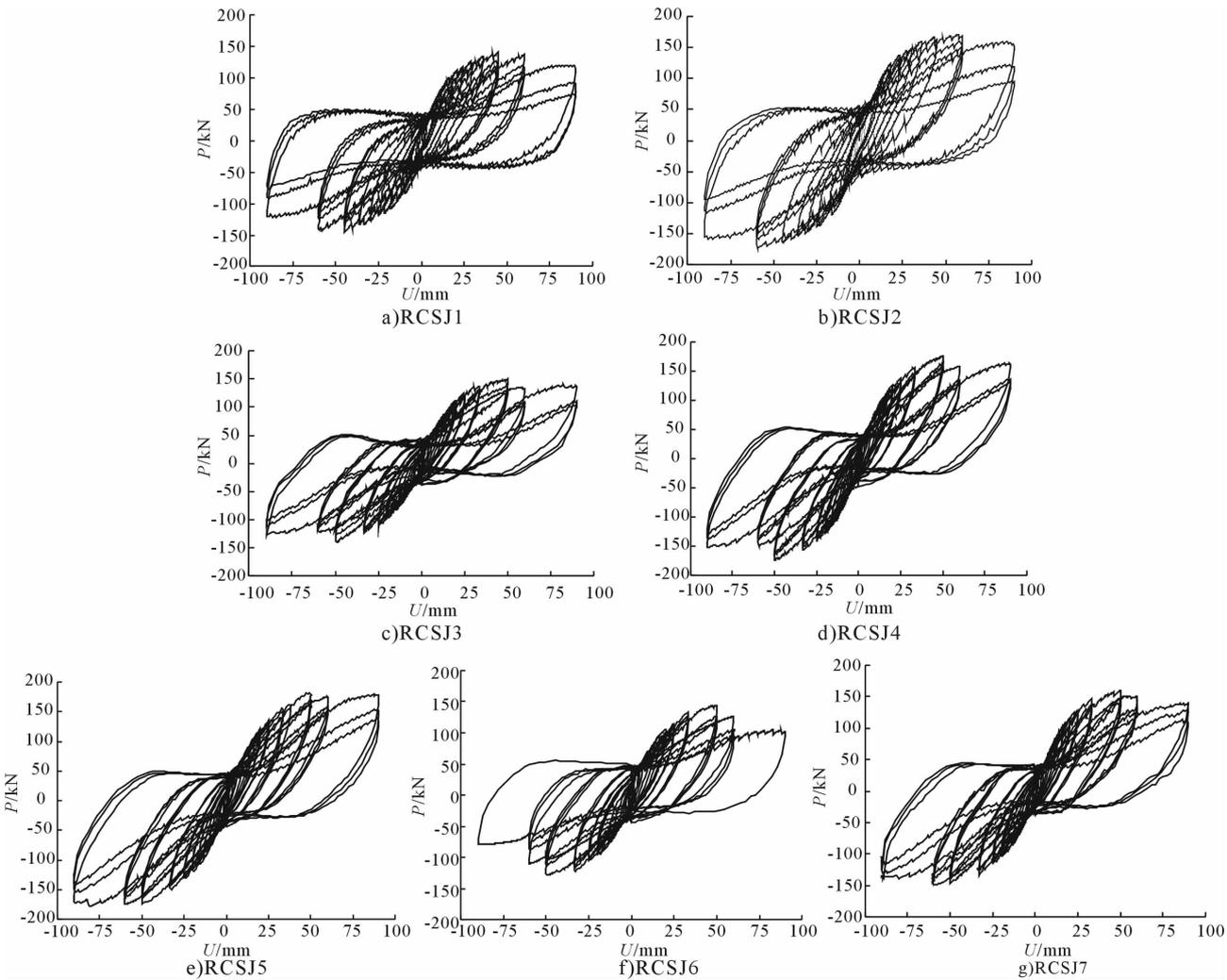


图5 试件的荷载-位移滞回曲线

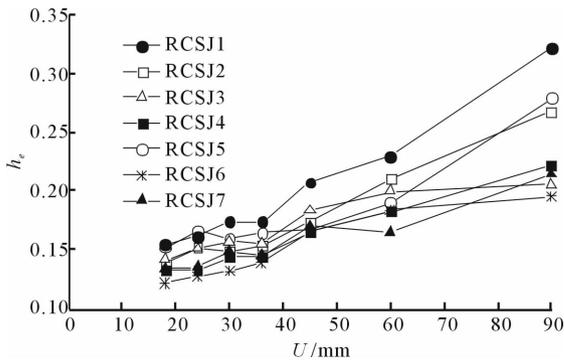


图6 等效阻尼系数

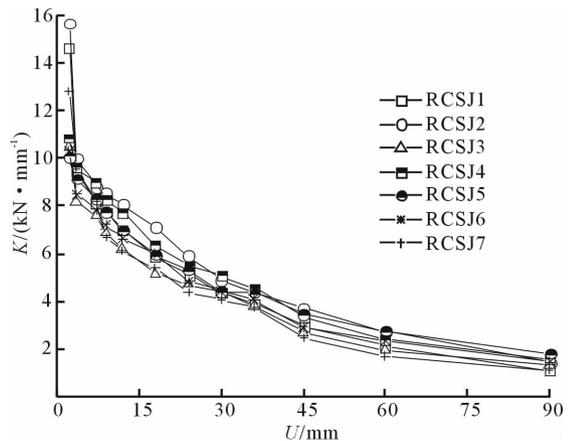


图7 各试件的刚度退化

线越稳定,耗能能力也较好. 刚度退化一般用环线刚度  $K$  表示,各试件的刚度退化示意图如图7所示.

由图7可以看出:各节点的刚度退化情况比较接近,刚度在加载初期下降很快,在开裂前后刚度值已降至很低,随后退化程度逐渐变慢,最后趋于平

缓.这说明螺栓直径大小和螺栓布置形式对刚度退化影响不大.

### 2.5 承载力退化特性分析

承载力退化特性是指结构在反复荷载作用下,

当保持相同的峰值位移时,其峰值荷载随循环次数的增多而降低的现象.承载力退化特性通过承载力退化系数表示.从位移为 50 mm 的循环开始,至构件承载力下降到极限荷载的 85% 为止,各试件承载力退化系数见表 2.

表 2 承载力退化系数

试件	位移/mm		
	50	60	90
RCSJ1	0.904	0.872	0.817
RCSJ2	0.942	0.867	0.845
RCSJ3	0.922	0.868	0.815
RCSJ4	0.932	0.867	0.836
RCSJ5	0.927	0.885	0.854
RCSJ6	0.878	0.793	0.762
RCSJ7	0.923	0.807	0.786

由表 2 可知,相同的螺栓布置形式,RCSJ1 和 RCSJ2 与 RCSJ3 相比,RCSJ4 与 RCSJ5 相比,RCSJ6 与 RCSJ7 相比,螺栓直径大的承载力退化速度较慢;不同的螺栓布置形式,RCSJ5 承载力退化速度最慢,而 RCSJ6 承载力退化速度最快,说明 3 行 3 列的螺栓布置形式抗震性能更好.

### 3 结论

对 7 个高强螺栓外伸式端板连接的蜂窝钢梁 - 复合焊接环式箍筋混凝土柱组合节点试件进行低周反复加载试验,分析组合节点在模拟地震作用下的破坏形态和抗震性能,并研究地震作用下组合节点合理螺栓布置形式,得出以下结论:

1) 高强螺栓外伸式端板连接型试件耗能增长

快,核心区箍筋、纵筋、混凝土能充分发挥作用,是一种合理的节点模式.

2) 蜂窝钢梁 - 复合焊接环式箍筋混凝土柱组合节点有较高的承载力与抗震性能,该节点的综合性能高于普通钢筋混凝土梁柱节点.

3) 相同的螺栓布置形式,螺栓直径大的其抗震受剪承载力高;不同的螺栓布置形式,螺栓尽量靠近梁翼缘的布置形式(3 行 3 列)的节点是外伸式端板连接型钢 - 混凝土组合节点更为合理的节点形式.

### 参考文献:

- [1] Griffis L G, Dowling P J. Composite Frame Construction. In *Constructional Steel Design* [M]. Holland: Elsevier Science Publishers, 1992.
- [2] Shiekh T M, Deierlein G G. Beam-column moment connection for composite frames: Part 1 [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115(11): 2858.
- [3] 聂建国, 秦凯. 方钢管混凝土柱节点抗剪受力性能的研究[J]. *建筑结构学报*, 2007, 28(4): 8.
- [4] 王文杰, 李升才. 蜂窝梁 - 焊接环式箍筋柱半刚性节点试验研究[J]. *郑州轻工业学院学报: 自然科学版*, 2009, 24(1): 71.
- [5] 肖岩, 安德森 J C. 螺栓连接钢 - 混凝土组合结构的开发[J]. *建筑钢结构进展*, 2005, 7(2): 12.
- [6] 颜军, 张德生, 李升才, 等. 端板螺栓连接混凝土柱 - 蜂窝钢梁节点延性及耗能研究[J]. *嘉应学院学报: 自然科学版*, 2010, 28(11): 39.
- [7] JGJ101-96, 建筑抗震试验方法规程[S].
- [8] 陈伟恩. 钢 - 混凝土组合结构节点抗震性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2002.