

楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点抗震性能的影响

贾连光¹,张梓健¹,徐晓霞²,李显超¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中国石油管道局工程有限公司东北分公司, 辽宁 沈阳 110031)

摘要 目的 研究地震作用下楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点抗震性能的影响, 为蜂窝式组合结构设计在楼板厚度方面提供理论依据. 方法 对正六边形开孔(开孔率70%)的蜂窝组合梁柱节点进行试验, 分析其在低周往复荷载作用下的塑性铰产生机理与破坏形式, 并进行有限元模拟; 通过建立5个楼板厚度不同的蜂窝组合梁柱节点, 对节点的滞回性能进行比较分析. 结果 开孔率为70%, 楼板厚度为90 mm的蜂窝组合梁柱节点可以将塑性铰充分外移到蜂窝孔处; 楼板厚度的增加, 不仅提高了节点刚度和承载力, 也增加了屈服位移、延性以及耗能能力, 但是在楼板厚度达到90 mm以后, 楼板的刚度和承载力提高不明显; 各试件的刚度退化比较接近, 试件进入屈服以后, 刚度退化更加明显. 结论 楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点的抗震性能影响明显, 起到非常重要的作用; 对不同楼板厚度蜂窝组合梁柱抗震性能的分析, 为蜂窝式组合结构设计提供了参考依据.

关键词 蜂窝组合梁; 节点; 抗震性能; 试验研究; 有限元

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Analysis on Seismic Behavior of Beam-Column Connection of Cellular Steel Frame by Finite Element Method

JIA Lianguang¹, ZHANG Zijian¹, XU Xiaoxia², LI Xianchao¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Petroleum Pipeline Engineering, Co., Ltd, Shenyang, China, 110031)

Abstract: In order to clarify the influence of thickness of slab on the seismic performance of honeycomb composite beam-column joints with regular hexagon and 70% porosity to analyze its corrosion mechanism and carry on a finite element simulation. According to this basis, made five cellular composite beam-column joints with different thickness of slab, then analyzed the hysteretic behavior of these joints. The result of the study shows: the composite beam-column joints with 90 mm thickness of slab and 70% porosity can externally move the plastic hinge to honeycomb holes. The increase of thickness of slab can promote the stiffness and bearing capacity of the slab is not

收稿日期: 2016-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578346)

作者简介: 贾连光(1961—), 男, 教授, 主要从事蜂窝式钢框架方面研究.

obvious. The degradation of every test specimen is very close and it is more obvious after the test specimen go into yielding situation.

Key words:cellular composite beam;joint;seismic behavior;experiment research;finite element

针对在强震发生过程中钢框架梁柱节点可能产生脆性裂缝而导致结构破坏的现象,国内外学者提出了许多提高其抗震性能的设计方法,并进行了梁柱节点理论分析以及试验研究^[1-5],其中对靠近节点的梁端进行局部削弱,是改善梁柱节点抗震性能的主要途径之一.蜂窝梁由于孔洞的存在使孔口处容易率先屈服^[6],降低蜂窝梁钢框架节点焊缝处脆断的可能性,并提高了转动能力,从而增加结构的延性,使梁柱节点的抗震性能得到改善^[7-10].笔者研究楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点的抗震性影响,通过建立5个楼板厚度不同的蜂窝组合梁柱节点有限元模型,对其抗震性能进行比较分析,得到楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点极限承载力的影响,为蜂窝组合梁柱节点的设计提供理论依据.

1 蜂窝组合梁柱节点试验

1.1 试件设计

试验用梁柱的钢材选用 Q345B,柱和梁的截面分别为 450 mm×300 mm×12 mm×16 mm 和 400 mm×200 mm×8 mm×12 mm 的 H 型钢,梁长 2 400 mm,开孔率为 70%,预留 850 mm 作为加载端,混凝土等级为 C30,板厚 90 mm,宽 850 mm,板内纵向受力钢筋布置方式为 Φ10@100,横向水平分布筋的布置方式为 Φ6@100,圆柱头栓钉高65 mm,直径 19 mm,双排焊接在梁上翼缘的上表面,横、纵向间距分别是 110 mm、150 mm. 由试验获得的混凝土和钢材材料力学性能分别见表 1 和表 2,试件主要尺寸如图 1 所示.

1.2 加载方式

试件的柱子两端用夹梁约束在自反力架上,柱顶采用液压千斤顶施加轴力,保持轴压比为 0.25 不变. 利用加载器在梁端离柱子翼

表1 混凝土材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of concrete materials

混凝土强度等级	E_c /MPa	$f_{cu,k}$ /MPa
C30	3.10×10^4	31.5

注: E_c 为混凝土受压弹性模量; $f_{cu,k}$ 为混凝土立方体抗压强度标准值.

表2 钢材材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel materials

钢材	规格/mm	$E_s/10^5$ MPa	f_y /MPa	f_u /MPa
钢板	8	2.0	367	521
	12	2.0	357	501
	16	2.0	352	496
钢筋	Φ8	2.0	411	579
	Φ10	2.0	402	562

注: E_s 为混凝土弹性模量; f_y 为钢筋的屈服强度设计值; f_u 为钢筋的极限强度设计值.

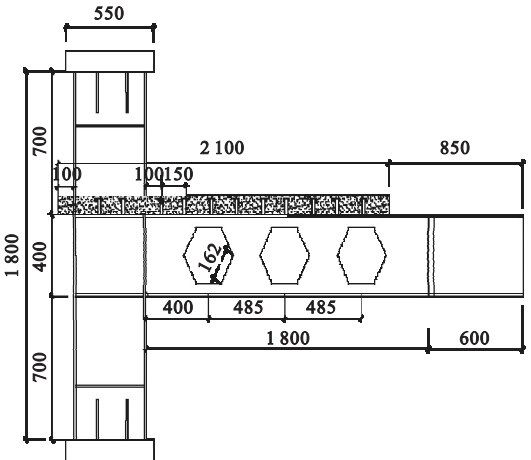


图1 试件FWZHL-70主要尺寸图

Fig. 1 Dimension of specimen FWZHL-70

缘1 800 mm处施加低周往复荷载,根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101—96),采用荷载控制和位移控制的双重加载方式进行低周往复加载.弹性阶段以力控制加载,试件屈服后,以位移控制加载,加载制度为1Δ、1.5Δ、2Δ、2.5Δ、3Δ…….Δ为屈服位移.蜂窝梁端部两侧分别设置一个三角架防止构件平面外失稳.加载装置如图2所示.

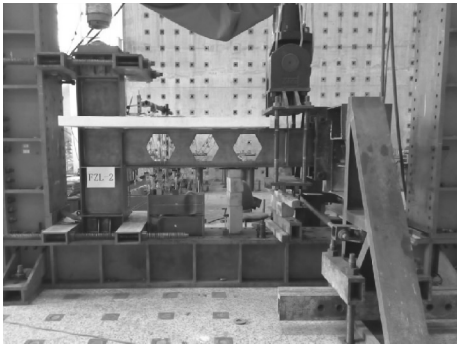


图2 加载装置

Fig. 2 Loading device figure

1.3 试验现象

在加载过程中,混凝土板柱的接触边缘出现裂缝并且扩展,当采用2倍屈服位移控制加载时,有裂纹出现在蜂窝梁的第一孔的孔角处且逐渐撕裂,裂纹逐渐变大并向下翼缘处延伸,此时第2个蜂窝孔上方的楼板表面裂纹增多,板上柱子边缘形成的裂缝扩展到板的边缘.当加大到2.5倍屈服位移时,达到试件的极限荷载215.3 kN.蜂窝梁的第2个蜂窝孔孔角撕裂,但撕裂的程度不如第一个孔处的裂纹大.当循环到第3周时,蜂窝梁的上下翼缘明显屈服,交界处的混凝土被压碎.此时荷载下降到极限荷载的85%以下,试验结束.试件破坏情况如图3所示.



图3 试验结果

Fig. 3 Test results

2 蜂窝组合节点滞回性能的有限元分析

笔者将栓钉、钢梁、肋板合并是一个整体,栓钉与钢筋网嵌入(Embedded Region)于混凝土中,梁与柱之间采用tie命令模拟焊

缝连接,不考虑焊接残余应力的影响.混凝土与钢梁表面以及混凝土与钢柱表面采用contact模拟其表面之间的相互作用,切向行为采用“罚”,摩擦系数定为0.35,法向行为采用“硬”接触.模型中柱两端设为刚接,约束了各个方向的平动与转动自由度.钢材采用三折线模型,混凝土应力—应变关系按我国《混凝土结构设计规范》(GB500100—2010)提出的设计表达方式计算.有限元模拟结果如图4所示.

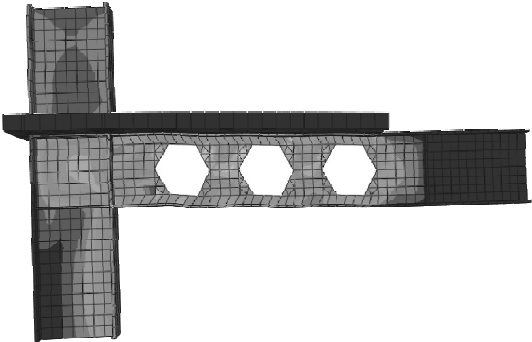


图4 有限元模拟结果

Fig. 4 Finite element simulation results

对比图3和图4可以看出,有限元模拟破坏形态与试件破坏形态相当,都是由于蜂窝孔洞的存在,使得腹板局部削弱,导致孔角应力比较集中,在低周往复荷载作用下,蜂窝孔发生屈服.之后上下翼缘也发生“波浪式”的屈曲现象,并且下翼缘屈曲比上翼缘要显著,最后在蜂窝孔处形成塑性铰,二者破坏形态吻合较好.试验与有限元模拟的滞回曲线对比如图5所示.

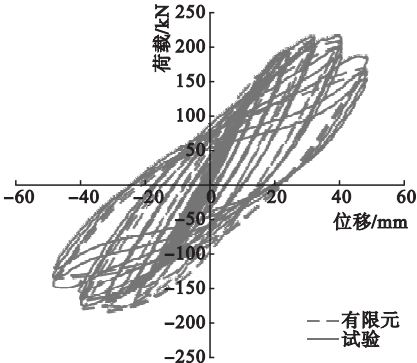


图5 试验与有限元的滞回曲线对比

Fig. 5 Comparison between experimental and finite element hysteretic curves

由图5可知,有限元模拟与试验得到的滞回曲线形状比较吻合,从承载力方面,有限元模拟值与试验值差异很小,误差在允许范围之内,证明了有限元模拟的结果有效,拟继续在此模型的基础上进入深入分析.

3 楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点抗震性能的影响

利用有限元软件建立楼板厚度为80 mm,90 mm,100 mm,110 mm,120 mm 的5个蜂窝组合梁柱节点模型,分别命名FZL-1、FZL-2、FZL-3、FZL-4、FZL-5,其开孔率为70%、孔型为六边形、纵横向钢筋的配筋率、楼板保护层厚度为25 mm,均保持不变.

3.1 滞回曲线

各试件的滞回曲线如图6所示.

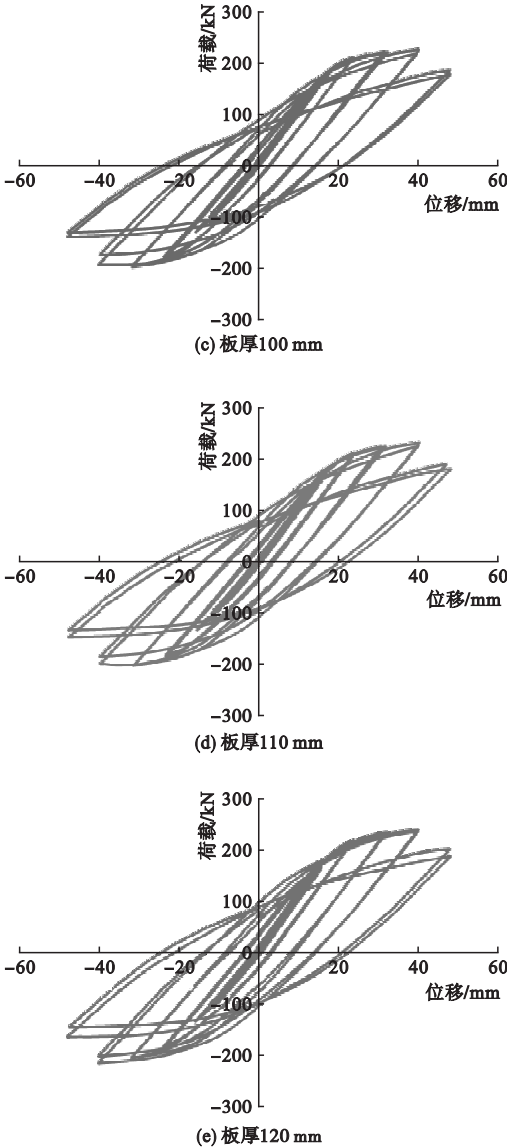
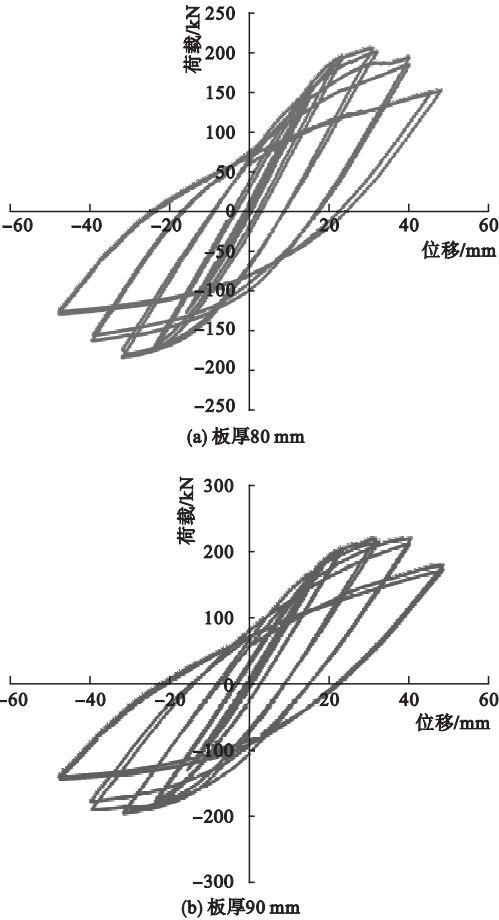


Fig. 6 Hysteresis curves contrast figure of different floor thickness

通过比较发现,5个试件的滞回曲线无明显差别,都出现捏缩现象,并且不够丰满,其原因在于腹板开孔很大,截面削弱严重,致使结构的吸能能力下降.混凝土的受压一侧面积比混凝土受拉时滞回曲线所围成的面积大,说明蜂窝组合梁中的混凝土在受压时的性能表现优于混凝土在受拉时的性能,与混凝土的抗压不抗拉特性一致.

3.2 骨架曲线

各试件的骨架曲线如图7所示.

图6 不同板厚的滞回曲线对比图

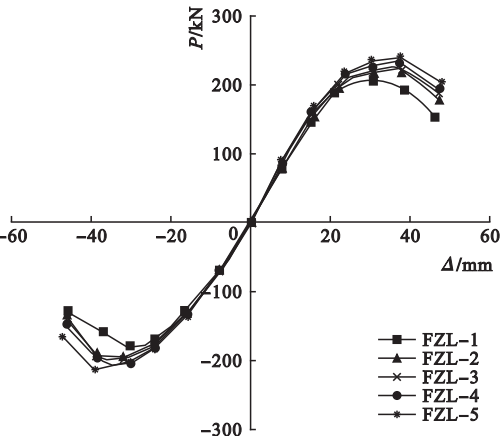


图7 各试件骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curves of each test part

由图7可以看出,各试件的骨架曲线发展趋势差别不大,楼板厚度的增加,提高了蜂窝组合梁柱节点的刚度和极限承载能力,但是楼板厚度增加到90 mm以后,对蜂窝组合梁柱节点的刚度和承载力的影响减小.在组合梁中,试件承载能力主要还是由钢梁来控制的.随着楼板厚度的增加,在受力时混凝土板以及板内钢筋承担的弯矩与剪力的作用越大,所以蜂窝组合梁柱节点的极限承载力随着楼板厚度的增加有所上升.在蜂窝梁形成塑性铰、楼板退出工作后,各个节点的承载力迅速下降,楼板厚度越小,下降趋势越大,说明楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点极限承载力起到不可忽视的作用.

3.3 延性与耗能性能分析

(1) 延性

试件延性用位移延性系数来评定.

$$\mu = \frac{u_u}{u_y} \quad (1)$$

式中: μ 为延性系数; u_y 为试件屈服位移; u_u 为试件破坏时的极限位移.

各试件的延性系数如表3所示.随着楼板厚度的增加,各试件的屈服位移、极限位移均有所增加,延性性能变好,主要原因是由于楼板厚度的增加,使组合梁截面的中和轴位置上移,下部钢材受力面积加大,下翼缘的变形增大,成为塑性铰形成的敏感区域,并且楼

板厚度越大,其抗剪作用越好,混凝土板对翼缘的约束也相对较好.

表3 试件延性系数表

Table 3 Ductility coefficient of specimens			
节点编号	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性系数
FZL-1	14.9	42.76	2.87
FZL-2	15.4	45.12	2.93
FZL-3	15.7	47.26	3.01
FZL-4	16.1	49.11	3.05
FZL-5	16.3	50.04	3.07

(2) 耗能性能分析

滞回曲线所围成的面积可直接反映出结构吸收和耗散的能量多少,即产生的变形能多少.笔者采用等效黏滞阻尼系数 h_e 和能量耗散系数 E 来评定试件的耗能能力^[11-14].

比较表4中等效黏滞阻尼系数和能量耗散系数的数值发现,随着楼板厚度的增加,提高了节点的耗能能力,因为楼板厚度的增加会使蜂窝组合梁的受力截面变大,进而提高了截面的承载能力,也使节点刚度得到了提高,对试件施加相同的位移时,试件的反力就越大,从而提高了节点的耗能能力.

表4 各试件的峰值荷载能量耗散系数

Table 4 Peak load energy dissipation coefficient of specimens			
节点编号	h_e	E	板厚/mm
FDL-1	0.267	1.68	80
FDL-2	0.278	1.75	90
FDL-3	0.288	1.81	100
FDL-4	0.296	1.86	110
FDL-5	0.302	1.90	120

3.4 刚度退化

当保持相同的峰值荷载时,随着循环次数的增加,峰值位移随也逐渐增大,这种现象称为刚度退化.笔者采用割线刚度来计算构件受荷载作用时的刚度^[15-19].图8为各试件的刚度退化曲线.

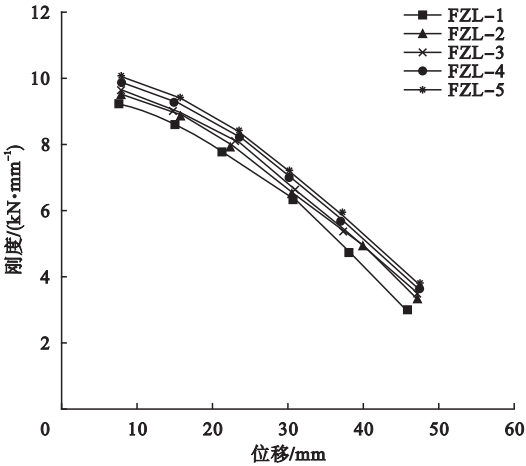


图8 各试件刚度退化曲线

Fig. 8 Schematic of stiffness degradation of specimens

由图8可以看出:楼板厚度不同情况下刚度退化趋势大致相同.所有试件前期的刚度退化情况不如后期明显,试件在前期刚度的退化情况较为缓慢,主要是由于混凝土的逐步破坏造成的,位移的不断增加使得荷载也不断加大,当试件进入屈服以后,蜂窝梁的孔口应力迅速增大且上下翼缘完全屈服.刚度退化的曲线下降明显.这些体现了蜂窝孔处截面削弱和孔角应力集中对蜂窝梁受力的不利影响^[20].

4 结 论

- (1)开孔率为70%、开孔形式为正六边形的蜂窝组合梁柱节点受力合理,可以达到塑性铰外移的目的,减小了节点发生脆性破坏的可能,可有效降低地震造成的危害.
- (2)楼板厚度对蜂窝组合梁柱节点极限承载力起到不可忽视的作用.在开孔率为70%,梁高400 mm,开孔形式为正六边形的蜂窝组合梁柱节点,随着楼板厚度的增加,虽然滞回曲线变化不太明显,但耗能能力变强;且蜂窝组合梁柱节点承载能力和刚度均得到了提高,但是楼板厚度达到90 mm之后,承载力和刚度随楼板厚度的变化均不明显.
- (3)由于楼板的组合效应使蜂窝梁的中和轴上移,蜂窝梁上翼缘的应力也会减小且

会约束上翼缘的变形,提高了蜂窝梁的极限承载力和刚度,同时也使延性和耗能能力得到加强.

参考文献

[1] 张望喜,段连蕊,廖莎,等.基于ABAQUS的砌体结构动力弹塑性时程分析[J].建筑结构,2016,46(1):64-69,86.
(ZHANG Wangxi, DUAN Lianrui, LIAO Sha, et al. Dynamic elastic-plastic time-history analysis of masonry structure based on ABAQUS [J]. Building structure, 2016, 46(1): 64-69, 86.)

[2] 贾连光,蒋少军,耿琳.蜂窝式钢构件轴心受压整体稳定计算[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(4):638-643.
(JIA Lianguang, JIANG Shaojun, GENG Lin. Analysis on the stability of the cellular component axially loaded [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2010, 26(4): 638-643.)

[3] RICLES J M, MAO C, LU L W, et al. Ductile details for welded unreinforced moment connections subject to inelastic cyclic loading [J]. Engineering structures, 2003, 25(5): 667-680.

[4] 余海群,钱稼茹,颜锋,等.足尺钢梁柱刚性连接节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2006,27(6):18-27.
(YU Haiqun, QIAN Jiaru, YAN Feng, et al. Experimental study on full-scale steel beam-to-column moment connections [J]. Journal of building structures, 2006, 27(6): 18-27.)

[5] CHEN C C, LIN C C. Seismic performance of steel beam to column moment connections with tapered beam flanges [J]. Engineering structures, 2013, 48: 588-601.

[6] 贾连光,姜莱,武金国,等.考虑混凝土板组合效应的蜂窝钢梁柱连接抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(4):54-61.
(JIA Lianguang, JIANG Lai, WU Jinguo, et al. Experimental study on seismic performance of cellular beam column connections considering composite action of floor slab [J]. Journal of building structures, 2017, 38(4): 54-61.)

[7] 谌伟.考虑组合效应的腹板开圆孔型节点的抗震性能研究[D].北京:北京交通大学,2009.
(CHEN Wei. Seismic behavior of connections with web opening and composite effect [D].

- Beijing:Beijing Jiaotong University,2009.)
- [8] 纪万金.组合效应对梁腹板开圆孔型节点抗震性能的影响研究[D].北京:北京交通大学,2010.
(JI Wanjin. Effect of composite action on seismic behavior of connection with opening on beam web[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2010.)
- [9] 贾连光,李庆文,张曰果.钢-混凝土蜂窝组合梁抗剪性能分析[J].工业建筑,2012,42(9):150-157.
(JIA Lianguang, LI Qingwen, ZHANG Yueguo. Analysis of shear behavior of steel-concrete cellular composite beam[J]. Industrial construction,2012,42(9):150-157.)
- [10] 曹宇翔,马宁,冯树国,等.考虑侧向支撑刚度影响的蜂窝钢梁临界弯矩计算研究[J].建筑钢结构进展,2013,15(4):24-27.
(CAO Yuxiang, MA Ning, FENG Shuguo, et al. Effect of lateral bracing stiffness on the critical flexural torsional buckling moment of castellated steel beams[J]. Progress in steel building structures,2013,15(4):24-27.)
- [11] 李红超.蜂窝式钢框架梁柱节点抗震性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2011.
(LI Hongchao. Research on seismic behavior of beam-column connection of cellular stell frame[D]. Shenyang :Shenyang Jianzhu University,2011.)
- [12] 蒋少军,贾连光,张书海,等.蜂窝式构件长细比的计算方法[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2010,26(1):81-83.
(JIANG Shaojun, JIA Lianguang, ZHANG Shuhai, et al. Computational method for the slenderness ratio of the cellular component[J]. Journal of Shenyang institute of engineering (natural science),2010,26(1):81-83.)
- [13] 李升才,黄小燕.外伸式端板连接蜂窝钢梁-混凝土柱组合节点抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(11):91-97.
(LI Shengcai, HUANG Xiaoyan. Experimental study on seismic behavior of honeycombed steel beam-concrete column composite joint with extended end-plate connections[J]. Journal of building structures,2013,34(11):91-97.)
- [14] 石永久,王萌,王元清.不同焊接节点构造形式钢框架整体抗震性能分析[J].工程力学,2012,29(11):71-79.
(SHI Yongjiu ,WANG Meng ,WANG Yuanqing. Analysis on seismic behavior of overall steel frame with different welded connection constructions [J]. Engineering mechanics, 2012,29(11):71-79.)
- [15] 郭彦林,黄李骥.腹板开洞钢拱的平面内稳定极限承载力设计理论及方法[J].建筑结构学报,2007,28(3):23-30.
(GUO Yanlin, HUANG Liji. Design theory and method for in-plane ultimate strength of arches with web openings[J]. Journal of building structures 2007,28(3):23-30.)
- [16] 李升才,颜军,王会丽.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):30-38.
(LI Shengcai, YAN Jun, WANG Huili. Pseudo static test research on concrete column-honeycombed steel beam composite joints[J]. Journal of building structures 2009,30(2):30-38.)
- [17] 王会丽,李升才.蜂窝钢梁-混凝土柱组合节点抗震性能试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2008,29(2):35-40.
(WANG Huili, LI Shengcai. Experimental research on seismic behavior of honeycomb steel beam-concrete column composite [J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science),2008,29(2):35-40.)
- [18] 何益斌,黄频,冷巧娟,等.腹板削弱型节点参数设计及梁单元刚度矩阵研究[J].工业建筑,2010,40(5):109-113.
(HE Yibin, HUANG Pin, LENG Qiaojuan, et al. Parameter analysis of steel reduced web connections and study on the frame element stiffness matrix [J]. Industrial construction, 2010,40(5):109-113.)
- [19] 杨娜,彭中华,许鑫森.钢结构梁腹板开圆孔组合节点性能数值分析[J].哈尔滨工业大学学报,2012,33(10):1232-1237.
(YANG Na, PENG Zhonghua, XU Xinsen. Numerical analysis of the behavior of composite connection with opening in the beam web in steel structure[J]. Journal of Harbin engineering university ,2012,33(10):1232-1237.)
- [20] 贾连光,李红超,吴一红.低周反复荷载下蜂窝式钢框架梁柱节点性能试验研究[J].土木工程学报,2012,45(1):61-68.
(JIA Lianguang, LI Hongchao, WU Yihong. Experimental study of the behavior of beam-column connections of cellular steel frames under low-cyclic reversed loading [J]. China civil engineering journal,2012,45(1):61-68.)