

T形钢管混凝土异形柱和工形钢梁节点 承载力性能试验

吴一然,石永久,孟令野

(清华大学土木工程系,土木工程安全与耐久教育部重点实验室,北京 100084)

摘要 目的 研究 T 形钢管混凝土异形柱和工形梁节点在反复荷载的承载力性能,为合理评价该类型节点的受力性能和承载能力提供依据。方法 对 3 个 T 形钢管混凝土异形柱和工形钢梁节点进行反复荷载试验研究,其中一个试件为全焊接节点,两个为栓焊混接节点,分析了节点在反复受力过程中的变形特征、承载力退化及能量消耗的能力;在试验结果的基础上建立有限元模型,并将有限元分析和试验得到的竖向荷载-变形曲线以及最大荷载进行对比。结果 使用具有足够数目塞焊孔的套筒连接的栓焊混接节点的滞回曲线最为饱满,计算得到的耗能系数最大;有限元分析结果和试验结果对比显示有限元模型与试验竖向荷载-梁端变形曲线以及最大荷载吻合良好,有限元分析结果可以用于参数分析。结论 T 形钢管混凝土异形柱和工形钢梁节点具有比较良好的滞回性能和耗能能力;梁与套筒间的焊缝质量以及套筒和柱之间的塞焊质量对节点的承载能力、变形能力和耗能能力都有重要影响,塞焊数目对承载能力有显著影响,而焊缝质量对耗能能力有显著影响。

关键词 T 形钢管混凝土异形柱;工形钢梁;节点承载力;滞回曲线;骨架曲线

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Experimental Studies of Joints Strength Performance with T-shape Concrete Filled Steel Tubular Columns and I-shape Steel Beams

WU Yiran, SHI Yongjiu, MENG Lingye

(Department of Civil Engineering, Key Lab of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

Abstract: To investigate the strength performance of joints with T-shape concrete filled steel tubular columns and I-shape steel beam, three joints, one of which is all-welded joint and the other two are joints with welded flanges and bolted webs, were tested under cycling loads. The deformation

收稿日期:2019-02-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51578313)

作者简介:吴一然(1992—),男,博士研究生,主要从事钢结构抗火方面研究。

behavior, degradation of carrying capacity and ability of energy dissipation were also analyzed. What's more, finite element models were established and the vertical load-deformation curve as well as the maximum loads acquired from finite element analysis were compared with test results. The joint with welded flanges and bolted webs as well as enough plug welding has the plumpest hysteretic curve and maximum energy dissipation coefficient. Besides, results of finite element analysis show good agreement with experimental results. Test and finite element analysis results show that joints with T-shape concrete filled steel tubular columns and I-shape steel beam have good hysteretic property and energy dissipation ability. The quality of welding between beams and sleeves and plug welding between sleeves and columns have great impact on the strength performance of joints, as well as deformation ability and energy dissipation ability. The number of plug welding influences strength performance, while the quality of welding influences energy dissipation ability. Also, these finite element models can be used in parameters analysis.

Key words: T-shape concrete filled steel tubular columns; I-shape steel beams; strength performance; hysteric curves; skeleton curves

异形柱框架结构体系具有柱截面厚度与填充墙等厚,无柱楞凸出,便于室内装饰装修和家具的布置,具有使用上的灵活性和方便性等优点,在装配式建筑中具有广泛的应用前景,我国于2006年正式颁布实施了《混凝土异形柱结构技术规程》(JGJ149—2006)^[1].然而钢筋混凝土异形柱存在着承载能力不足、轴压比限值过低、抗震性能不理想等缺点,尤其是梁柱节点处钢筋密集难以施工的问题给异形柱的使用带来了很大的不便^[2].而钢管混凝土异型柱的应用可以一定程度上弥补这些缺点,近年来钢管混凝土异形柱已成功运用于实际建筑钢结构工程当中,钢管混凝土异形柱与钢梁的节点构造和性能是需要重点研究和解决的问题.《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS159:2004)^[3]中给出了四种推荐的矩形钢管混凝土柱与钢梁的节点连接形式对此类节点均不适用.而《轻型钢结构住宅技术规程》(JGJ209—2010)^[4]中给出了一种钢管柱与工字形钢梁的刚性连接方式,即在柱外面加套筒的套筒式梁柱节点,在此类节点中有比较良好的应用.

国内外学者对异形柱展开了大量的研究.戴教芳^[5]、罗永坤^[6]分别对异形柱的设计及受力特性进行了概念上的分析,完成了

对异形柱的初步探索. Y. M. Alostaz^[7]在1996年采用ABAQUS建立了6种圆钢管-钢梁节点的非线性有限元模型,分析了其在不同柱宽厚比、柱轴力、梁剪跨比下的塑形及弹性性能并进行了比较.康谷贻等^[8]设计了27根异形柱,分析了翼缘、低周反复荷载、斜向水平荷载和弯矩比对框架中异形柱受剪性能的影响. C. H. Kang^[9]研究了一种新型的方钢管混凝土柱-工形钢梁节点,其在节点处用四个额外的T形加劲板进行加强,并在节点内部加入钢筋或钢板. I. Nishiyama^[10]对7个内柱节点、2个边柱节点及1个空间节点共10个节点进行静力及反复荷载下的试验研究,分析了材料强度、轴力、隔板形式、荷载方向对其受力性能的影响. 聂建国^[11]对6个方钢管混凝土柱节点试件进行了试验研究,并用ANSYS对方钢管混凝土柱内隔板式节点和外加强环式节点进行了三维非线性有限元分析. K. J. Shin^[12]等对三组共7个钢管混凝土-钢梁试件进行了反复荷载下的试验研究及有限元分析. 张爱林^[13]等利用ANSYS分析了T形钢异形柱框架节点的基本力学性能. 林明森^[14]对9个T形钢管混凝土柱-钢梁节点进行了试验研究,分析其破坏形态和受力性能. 薛建阳^[15-16]对9个矩形钢管混凝土异形柱-钢梁节点试验研究的基础上对节点

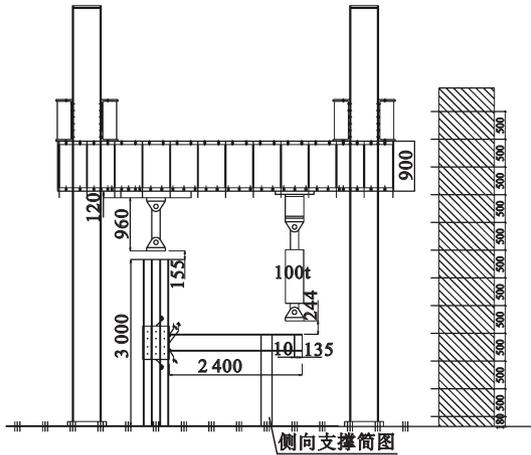


图2 节点试验整体试验装置示意图

Fig. 2 Testing apparatus of joints experiments

使用的加载仪器包括 500 t 动作器(用于施加柱顶固定大小的轴压)和 300 t 动作器(用于施加柱端往复的竖向荷载). 加载程序先采用荷载控制进行加载: 首先进行预加载, 按照最大荷载为 30 kN 正向和反向各做一次加载; 其次正向加载, 根据荷载变形曲线寻找屈服点(斜率拐点), 记录屈服荷载和屈服变形. 然后采用变形控制进行加载: 1 倍、2 倍、3 倍屈服变形正反双向加载各 3 个循环; 最后 4 倍屈服变形, 正反双向加载, 1 个循环, 停止试验.

1.3 试验量测方案

节点试验中的量测数据共有 17 个, 其中包括变形 5 个: 加载梁端竖向变形 u_1 、柱顶水平变形 u_2 、节点处梁上翼缘相对柱水平变形 u_3 、节点处梁下翼缘相对柱水平变形 u_4 、柱脚水平变形 u_5 ; 荷载 2 个: 施加在梁端的竖向荷载 F_1 和施加在柱顶的竖向荷载 F_2 ; 应变 10 个: 节点处梁端上翼缘 3 个, 下翼缘 3 个, 腹板 4 个. 具体变形计架设和应变片贴片位置如图 3 所示.

由于节点处梁的上下翼缘分别增加了一块加强板, 而此时梁端塑性铰应当出现在梁端加强板以外, 贴片位置为距离加强板边缘 50 mm, 而加强板长度为 175 mm, 所以位置为距离梁端 225 mm. 试验过程的变形控制以

加载梁端竖向变形 u_1 的值为标准. 第一次的屈服变形由观测荷载-变形曲线得到, 之后通过控制 u_1 值来进行加载.

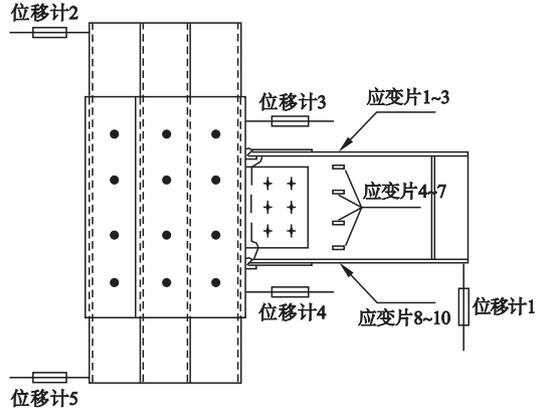


图3 节点试验量测方案示意图

Fig. 3 Measuring scheme of joints tests

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

由于 30kN 这一荷载等级属于预加载, 目的是为了消除缝隙等, 所以当荷载等级为 30kN 时并没有明显的试验现象, 整体试件处于弹性阶段. 当控制加载点处变形为 1 倍屈服变形 u_y 时, 开始出现明显试验现象. 具体试验现象如表 1 所示. 3 个试验结果呈现出不同的破坏模式, 试件 1 和试件 2 的焊缝都出现了破坏, 梁上下翼缘, 加强板和柱翼缘的焊缝都出现了断裂; 试件 2 的柱套筒还出现了竖向的撕裂, 有竖向裂缝产生. 试件 3 连接处的螺栓和焊缝都没有出现任何破坏, 最终的塑性铰出现在梁端加强板以外. 图 4 为各个试件的破坏形态.

分析各试件的加工制作可以推断不同破坏形态的成因. 试件 1 的梁柱节点为全焊接, 本身的焊接工艺没有问题, 主要问题在于盖板和梁并没有同时焊接到柱上, 而是先将梁焊接在柱上, 然后再将盖板焊接在梁上, 这样会导致盖板处的焊缝出现更多的缺陷, 更容易破坏, 而最终试验结果发现试件 1 的破坏正是由于焊缝撕裂导致的. 试件 2 的梁柱节点为栓焊混接, 连接没有问题, 但是由于原

本设计正面套筒和柱之间的只焊接了4个塞焊,数量过少,所以出现了套筒的焊缝处破坏现象.而试件3的焊缝和螺栓连接都没有出

现破坏,得到了非常良好的破坏形态即加强板外出现塑性铰,以梁翼缘和腹板出现塑性屈曲为破坏特征.

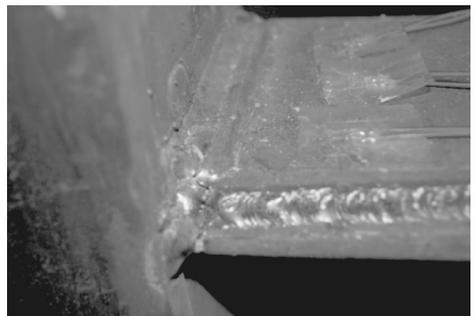
表1 不同试件不同加载等级下的试验现象

Table 1 Experimental phenomena of each specimen under different levels of load

加载等级	试验现象		
	试件1	试件2	试件3
荷载控制 30 kN	没有明显的试验现象;试件整体处于弹性阶段	没有明显的试验现象;试件整体处于弹性阶段	没有明显的试验现象;试件整体处于弹性阶段
变形控制 $1u_y$	梁端变形比较明显;荷载归零后变形可以恢复	梁端变形比较明显;荷载归零后变形可以恢复	梁端变形比较明显;荷载归零后变形可以恢复
变形控制 $2u_y$	第一次循环反向加载时听到了焊缝断裂的脆响;第二次循环结束时观测到梁上翼缘焊缝断裂	第一次循环反向加载时梁下翼缘焊缝断裂;第三次循环结束时发现柱套筒处竖向撕开(裂缝方向向上)	第一次循环正向加载时上翼缘屈曲;第一次循环反向加载时下翼缘屈曲;屈曲发生在加强板外
变形控制 $3u_y$	焊缝断裂的脆响变得非常密集	仅仅进行了一次循环,套筒被完全撕开;加强板与柱翼缘之间的焊缝断裂	腹板屈曲;最大荷载下降
变形控制 $4u_y$	梁上下翼缘、加强板的裂缝全部断裂;梁端残余变形非常大	—	梁的上下翼缘和腹板屈曲严重;梁端残余变形非常大;加强板内区段,螺栓和焊缝均无破坏



(a)试件1破坏形态:腹板焊缝断裂



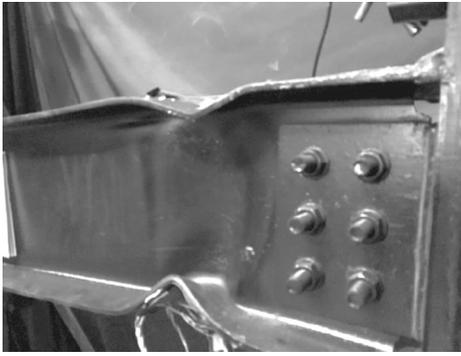
(b)试件1破坏形态:翼缘焊缝断裂



(c)试件2破坏形态:套筒竖向撕裂



(d)试件2破坏形态:焊缝损伤



(e) 试件3破坏形态:腹板屈曲



(f) 试件3破坏形态:翼缘屈曲

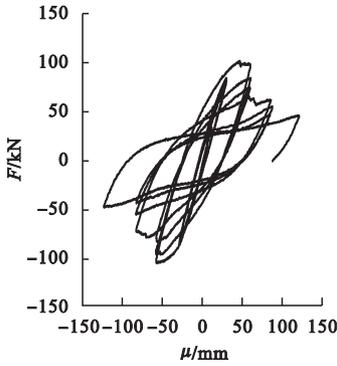
图4 各试件破坏形态

Fig. 4 Failure modes of each specimen

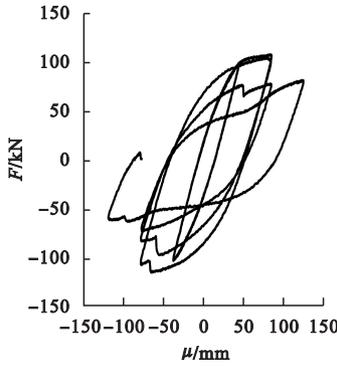
2.2 荷载-梁端竖向变形滞回曲线

图5所示给出了3个不同试件的荷载-梁端竖向变形滞回曲线. 图中, F 为梁端竖向荷载, u 为梁端竖向变形. 从图中可以看出在

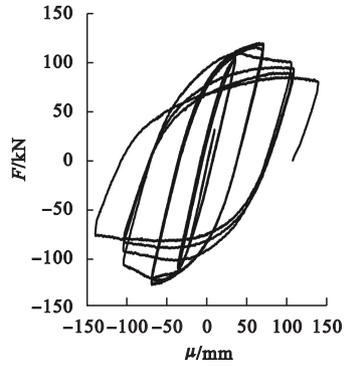
$1u_y$ 时, 3个试件都处于弹性阶段, 图像基本都为直线, 最大荷载有一定的差别, 3个试件的实际屈服荷载分别为: 82.831 kN, 98.200 kN, 108.505 kN.



(a) 试件1



(b) 试件2



(c) 试件3

图5 各试件的荷载-变形滞回曲线

Fig. 5 Load - deformation hysteresis curves of each specime

在试件1的加载中, 每个荷载下试件的滞回曲线是相对比较饱满的梭形. 但是同一荷载等级下不同循环的最大荷载都发生了变化. 不同荷载等级每次循环正反向最大荷载折减汇总如表2所示. 最大荷载的折减在一定程度上可以反映节点的损伤, 也就是节点焊缝的断裂情况, 可以看出在 $2u_y$ 加载中正向加载时荷载折减比较大, 所以上翼缘焊缝破坏更加严重, 随着循环次数的增多, 焊缝破坏情况也越来越严重. 同时在正向加载时, 荷载有一个突降, 此时焊缝突然开裂, 所以荷载急剧下降. 而在 $3u_y$ 加载中反向加载时荷载折减比较大, 所以下翼缘焊缝破坏更加严重,

随着循环次数的增多, 焊缝破坏情况也越来越严重.

同样在试件2的加载中也出现了比较饱满的梭形滞回曲线, 同时应为在加载中套筒出现了竖向裂缝, 被整个竖向撕裂, 所以也出现了最大荷载折减的情况, 而且由于套筒撕裂导致整个结构的加载出现了不安全因素, 所以 $3u_y$ 只加载了一个循环, 这个循环中的滞回曲线出现了奇怪的形状, 反向最大荷载相比正向小很多, 说明下翼缘焊缝和套筒破坏得更加严重.

试件3的加载中, 滞回曲线更加饱满, 说明了节点良好的滞回性能. $2u_y$ 加载中相对于

循环1,正反向最大荷载在循环2和循环3中都没有发生太大的变化,说明节点的承载能力仍然良好,没有发生损伤,观察试验也没有发现焊缝和螺栓发生破坏. $3u_y$ 加载中,循

环1的荷载达到峰值后有明显下降,这是因为翼缘和腹板屈曲达到了一定程度,荷载已经无法继续施加,而随着循环次数的增多,最大荷载减小,说明翼缘和腹板的塑性屈曲加剧.

表2 试件1及试件2不同荷载等级每次循环最大荷载折减百分比

Table 2 Reduction of maximum loads of specimen 1 and 2 under different levels of load

试件	循环次数	最大荷载折减比例/%			
		$2u_y$ (正向)	$2u_y$ (反向)	$3u_y$ (正向)	$4u_y$ (反向)
试件1	第2次	17.08	8.57	15.48	30.05
	第3次	26.25	20.82	27.74	44.81
试件2	第2次	3.19	15.50	—	—
	第3次	27.89	36.53	—	—

2.3 骨架曲线

根据荷载-变形滞回曲线,可以得到各个试件在各个加载级第1圈、第2圈和第3圈的骨架曲线,如图6所示.试件1和试件2出现了明显的承载力退化,这主要是由焊缝破坏和套筒撕裂导致,其中试件2的承载力退化非常明显,出现了影响试验的不安全

因素,试验被迫终止.试件3也出现了一定的承载力退化,这是由节点处梁翼缘和腹板的屈曲导致的.根据 $1u_y$ 内的荷载-变形数据可以拟合得到各个试件的初始刚度,各个试件的初始刚度相差不大,平均初始刚度 K 为 2.6877 kN/mm .

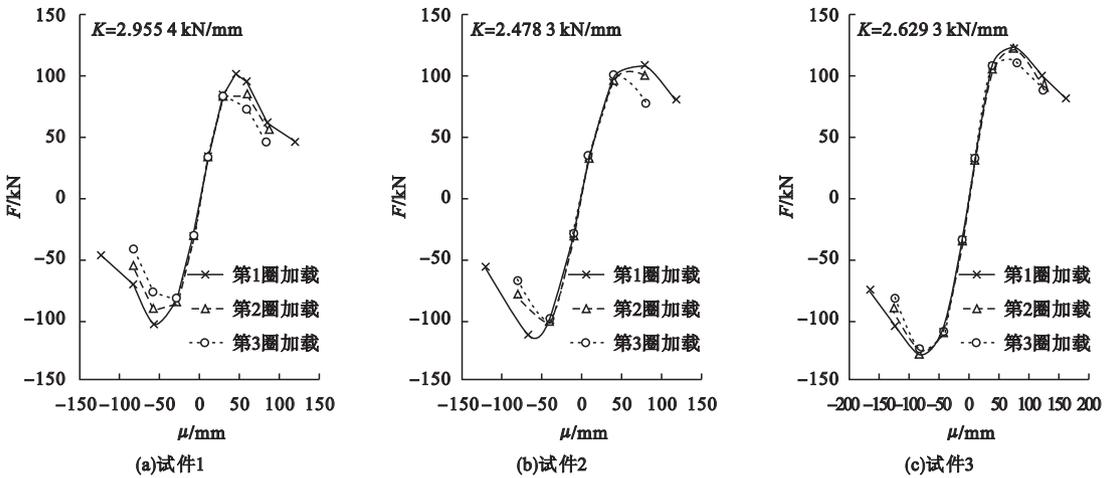


图6 各试件的骨架曲线

Fig. 6 Skeleton curves of each specimen

2.4 变形与耗能能力

各个试件每半圈的梁端塑性变形以及累积塑性变形如图7所示.当超过屈服荷载后,每个试件的累积塑性变形开始显著变大.试件3的累积塑性变形最大为 2028.65 mm ,试件1和试件2的累积塑性变形分别为 1208.88 mm 和 938.35 mm (试件2循环次

数较少).

结构的耗能系数以荷载-变形曲线所包围的面积来衡量,一般滞回环越饱满,结构的耗能性能越好,耗能系数也越大.耗能系数定义为一个周期内能量耗散量与振幅最大处所具弹性势能的比值,故在此用滞回环包围的面积与滞回环卸荷点至横坐标轴之间三角形

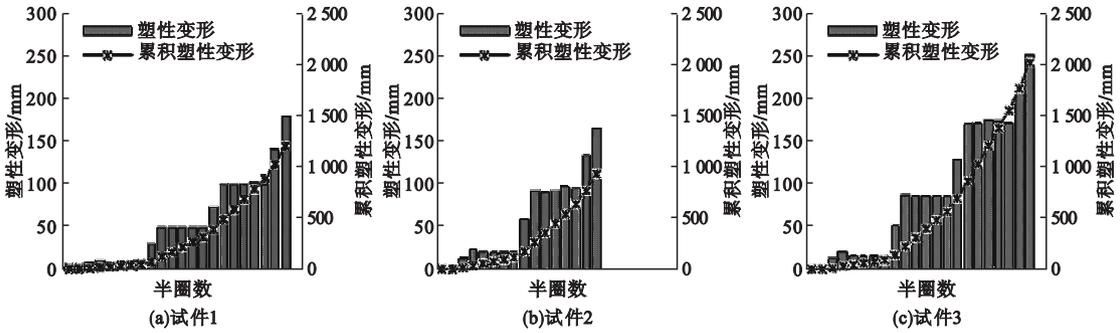


图7 各试件的每半圈的梁端塑性变形以及累积塑性变形试件的骨架曲线

Fig. 7 The beam - end plastic deformation of each specimen

的面积之比来定义,如图8所示,耗能系数E的表达式如式(1)所示.

$$E = \frac{S_{ABCD}}{S_{OBF} + S_{ODE}} \quad (1)$$

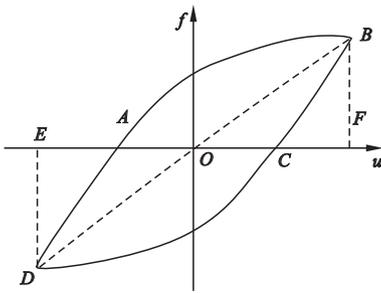


图8 试件耗能系数计算示意图

Fig. 8 Schematic diagram of calculation of energy dissipation coefficient

各个试件计算得到的耗能系数如表3所示.除加载变形为1u_y时,各试件耗能系数小

表3 试件耗能系数

Table 3 Energy dissipation coefficients of each specimen

加载等级	循环次数	能耗系数		
		试件1	试件2	试件3
变形控制 1u _y	第1次	0.447	0.725	0.595
	第2次	0.352	0.754	0.559
	第3次	0.326	0.722	0.546
变形控制 2u _y	第1次	1.192	1.645	1.514
	第2次	1.246	2.018	1.706
	第3次	1.213	1.873	1.784
变形控制 3u _y	第1次	1.612	1.801	2.382
	第2次	1.506	—	2.586
	第3次	1.520	—	2.539
变形控制 4u _y	第1次	1.649	—	2.634

于1,其他等级的加载中试件的耗能系数均大于1,各试件都具有较为良好的耗能能力.相比之下试件3的耗能能力最强而试件1最弱.试件1的耗能能力最弱是因为试件1的破坏是由试件的焊缝开裂导致,塑性发展不足;试件2前在加载变形为1u_y和2u_y时具有不错的耗能能力,与试件3差距不大,但在第加载变形为3u_y时出现了套筒竖向撕裂,导致试件耗能能力下降甚至试验停止.

3 有限元分析

由于试件3的滞回曲线更加饱满说明试件3具有良好的滞回性能,因此在试验3的基础上建立了有限元模型进行数值计算.图9反映了有限元模型中当节点发生破坏时在节点处形成的塑性铰.

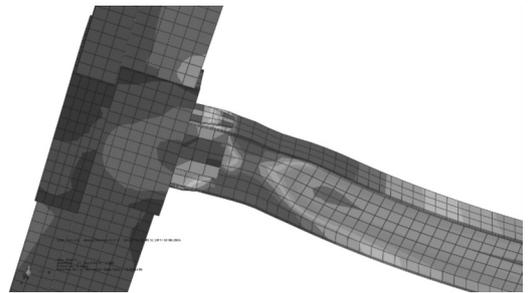


图9 有限元模型中形成的塑性铰

Fig. 9 Plastic hinge at the end of beam in the finite element model

竖向荷载-梁端变形曲线的有限元模拟和试验结果对比如图10所示.由图可知,有限元分析结果和试验结果吻合较为良好,每

个加载循环圈有限元计算结果和试验结果吻合得比较好,可以有效计算荷载的下降段. 试验和有限元分析的加载过程均由变形控制. 因而需要将有限元分析计算得到的不同变形加载过程中的最大荷载 P_{FEM} 与试验得到的最大荷载 P_{TEST} 进行对比,如图 11 所示. 其中,部分试验结果略高于有限元分析结果但总体而言有限元结果和试验结果吻合良好,有限元模型具有一定的精确性和合理性,经过验证的有限元模型可以用于参数分析.

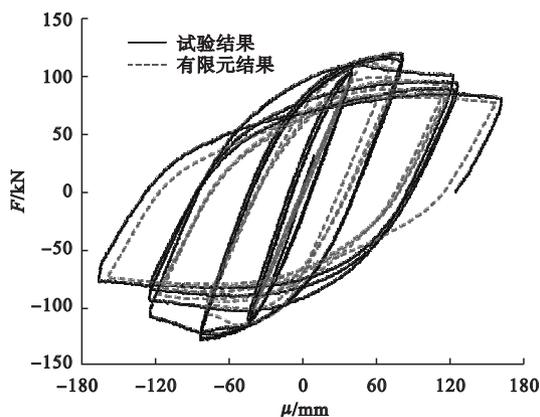


图 10 竖向荷载 - 梁端变形曲线对比

Fig. 10 Comparison of beam-end vertical load-deformation curves between tests and finite element analysis

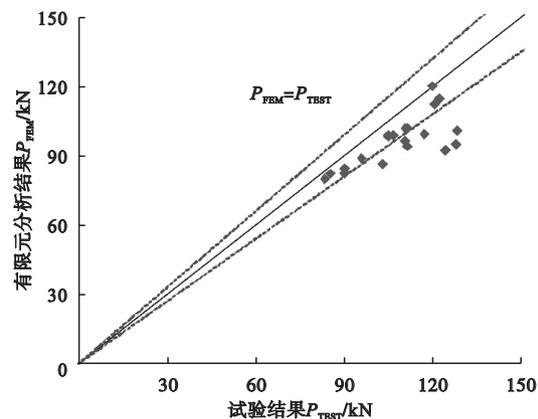


图 11 有限元分析和试验中的最大荷载

Fig. 11 Comparison of maximum loads between tests and element analysis results

4 结论

(1) 在保证焊接等工艺以及构造满足规

范要求时, T 形钢管混凝土异形柱和工形钢梁节点具有比较好的滞回性能和耗能能力.

(2) 梁与套筒间的焊缝质量以及套筒和柱之间的塞焊质量对节点的承载能力、变形能力和耗能能力至关重要,在施工时加强保证焊接质量的措施,塞焊的数量也需要满足设计和规范的要求.

(3) 塞焊数目对节点承载能力有显著影响,而焊缝质量主要影响节点耗能能力.

(4) 有限元分析结果和试验结果吻合比较好,可以用于参数分析.

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土异形柱结构技术规程: JGJ149—2006 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (Ministry of Construction for the PRC. Technical specification for concrete structures with specially shaped columns: JGJ149—2006 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.)
- [2] 陈美美. 矩形钢管混凝土异形柱 - 钢梁框架节点的受力性能及 ABAQUS 有限元分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013. (CHEN Meimei. Research on the mechanical behavior and ABAQUS analysis of joints between steel beams and concrete filled rectangular steel tube column [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.)
- [3] 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS 159:2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004. (China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for structures with concrete-filled rectangular steel tube members: CECS 159:2004 [S]. Beijing: China Plans Publishing House, 2004.)
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 轻型钢结构住宅技术规程: JGJ209—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Ministry of Construction for the PRC. Technical specification for lightweight residential building of steel structure: JGJ209—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [5] 戴教芳. 多层框架异形柱设计探索 [J]. 工业建筑, 1996, 26(6): 33—35. (DAI Jiaofang. Design of special-shaped columns used in multistory frame [J]. Industrial construction, 1996, 26(6): 33—35.)
- [6] 罗永坤. 异形柱对高层结构受力特性影响浅析 [J]. 建筑结构, 1996(2): 22—25. (LUO Yongkun. Analysis of influence of spe-

- cial-shaped columns on the mechanical behaviors of high-rise structures[J]. Building structures, 1996(2):22-25.)
- [7] ALOSTAZ Y M, SCHNEIDER S P. Analytical behavior of connections to concrete-filled steel tubes [J]. Journal of constructional steel research, 1996, 40(2):95-127.
- [8] 康谷貽, 巩长江. 单调及低周反复荷载作用下异形截面框架柱的受剪性能[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(5):22-31.
(KANG Guyi, GONG Changjiang. Investigation of shear behavior of special shaped frame columns under monotonic load and low frequency cyclic loading [J]. Journal of building structures, 1997, 18(5):22-31)
- [9] KANG C H, SHIN K J, OH Y S, et al. Hysteresis behavior of CFT column to H-beam connections with external T-stiffeners and penetrated elements [J]. Engineering structures, 2001, 23(9):1194-1201.
- [10] NISHIYAMA I, FUJIMOTO T, FUKUMOTO T, et al. Inelastic force-deformation response of joint shear panels in beam-column moment connections to concrete-filled tubes [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(2):244-252.
- [11] 聂建国, 秦凯, 肖岩. 方钢管混凝土柱节点的试验研究及非线性有限元分析[J]. 工程力学, 2006, 23(11):99-109.
(NIE Jianguo, QIN Kai, XIAO Yan. Experimental investigation and nonlinear finite element analysis on the behavior of concrete-filled square steel tubular column connections [J]. Engineering mechanics, 2006, 23(11):99-109.)
- [12] SHIN K J, KIM Y J, OH Y S. Seismic behavior of composite concrete-filled tube column-to-beam moment connections [J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(1):118-127.
- [13] 张爱林, 刘显旺, 于劲, 等. 单调荷载下钢异形柱(T形)框架节点的力学性能研究[J]. 钢结构, 2009, 24(2):15-19.
(ZHANG Ailin, LIU Xianwang, YU Jin, et al. Research on mechanical property of frame joint with T special shaped section column [J]. Steel structures, 2009, 24(2):15-19)
- [14] 林明森. T形钢管混凝土组合柱-钢梁连接节点抗震性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
(LIN Mingsen. Investigation of seismic behavior of joint of T-shaped concrete-filled steel tubular composite column and steel beam [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.)
- [15] 薛建阳, 陈茜, 周鹏, 等. 矩形钢管混凝土异形柱-钢梁框架节点受剪承载力研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8):51-57.
(XUE Jianyang, CHEN Xi, ZHOU Peng, et al. Shear capacity of joints between concrete-filled square steel tubular special-shaped columns and steel beams [J]. Journal of construction structure, 2012, 33(8):51-57.)
- [16] 周鹏, 薛建阳, 陈茜, 等. 矩形钢管混凝土异形柱-钢梁框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(8):41-50.
(ZHOU Peng, XUE Jianyang, CHEN Xi, et al. Experimental study on seismic performance of joints between concrete-filled square steel tubular special-shaped columns and steel [J]. Journal of construction structure, 2012, 33(8):41-50.)
- [17] 戎贤, 张健新, 李艳艳. 提高异形柱框架节点抗震性能的试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(2):169-175.
(RONG Xian, ZHANG Jianxin, LI Yanyan. Experimental research on seismic behavior of joints of specially shaped columns [J]. Journal of Harbin engineering university, 2013, 34(2):169-175.)
- [18] 戎贤, 张健新, 李艳艳. T形钢骨增强异形柱节点抗震性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(3):422-428.
(RONG Xian, ZHANG Jianxin, LI Yanyan. Experimental research on seismic behavior of joints of specially shaped columns with T-shaped steel reinforcement [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (nature science), 2014, 30(3):422-428.)
- [19] 戎贤, 张健新, 李艳艳. 往复荷载作用下异形柱节点抗震性能改善措施[J]. 工程力学, 2015, 32(8):58-65.
(RONG Xian, ZHANG Jianxin, LI Yanyan. Improvement measure on aseismic behavior of specially shaped column joints under cycle loading [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(8):58-65.)
- [20] 戎贤, 王浩, 张健新. T形截面钢-混凝土组合异形柱抗震性能试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(5):408-413.
(RONG Xian, WANG Hao, ZHANG Jianxin. Experimental research on seismic behavior of steel-concrete composite T-shaped columns [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2019, 52(5):408-413.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)