

文章编号:1001-5132 (2010) 02-0109-05

# 开孔方管柱与工字钢梁连接的试验 研究及有限元模拟分析

王剑平<sup>1</sup>, 王雪娇<sup>2</sup>, 王新堂<sup>2\*</sup>

(1.浙江二建钢结构有限公司, 浙江 宁波 315207; 2.宁波大学 建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 针对工程中应用广泛的方管柱与工字型钢梁的端板连接, 对 1 组不同构造的节点进行了静力试验研究及有限元模拟分析, 试验结果不仅得到了连接点的  $M-\theta_r$  关系曲线, 而且也得到了方管柱开孔周围的应力分布, 为分析此类连接点的力学特性提供了理论依据. 试验结果同时表明: 端板厚度的增加及外伸端板的连接螺栓至上下翼缘板距离的增加均会提高连接的初始刚度. 此外, 在对试验结果与有限元模拟分析进行比较的基础上, 还得到了与试验结果相对应的  $M-\theta_r$  拟合曲线, 且结果表明利用幂函数模型拟合节点的  $M-\theta_r$  曲线是可行的, 而且在相当大的转角范围内与试验结果相当吻合, 拟合结果为实际应用提供了可供参考的数学表达式.

**关键词:** 开孔方管; 半刚性连接; 有限元模拟; 数学拟合

**中图分类号:** TU391; TU317      **文献标识码:** A

目前国内对钢结构梁柱节点的半刚性连接开展了一系列试验研究和模拟分析<sup>[1-2]</sup>, 且研究内容主要集中在梁柱端板连接、T 型钢连接、顶底角钢连接以及带双腹板顶、底角钢连接, 但对于开孔方管柱与工字钢梁的端板连接还未见报道. 文献[3]对 H 型钢梁柱外伸端板螺栓连接节点性能进行了研究, 提出用节点尺寸来计算节点初始转动刚度  $k_i$  的计算公式, 通过与试验结果比较, 验证了初始转动刚度  $k_i$  计算公式的正确性, 并对节点的破坏形式、抗震性能及影响节点初始转动刚度的因素进行了分析讨论. 文献[4]进行了螺栓角钢连接节点的三维非线性有限元分析, 探讨了螺栓角钢连接的受力性能. 国外学者对半刚性连接性能的研究起

步较早, 并开展了较多的试验研究和理论分析<sup>[5-6]</sup>, 并建立了初步的设计理论<sup>[7]</sup>, 但由于规范之间的差异, 这些理论不能直接照搬. 我国现行《钢结构设计规范》(GB50017)也只针对半刚性高强螺栓连接规定了“梁柱半刚性连接是有限的转动刚度, 在承受弯矩的同时会产生相应的转角, 在内力分析时必须确定连接矩—转角特性, 以便考虑变形的影响”, 但并没有给出  $M-\theta_r$  关系的具体数值. 笔者所研究的对象为具有一定工程应用前景的方管柱与工字型钢梁的连接问题, 且试验模型的方管柱一侧开设了手孔, 能更好地反映实际情况. 研究所得出的  $M-\theta_r$  曲线和几点结论可供具有该类节点的整体结构分析与实际设计参考.

收稿日期: 2009-10-15.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://3xb.nbu.edu.cn>

基金项目: 浙江省科技计划项目(2008C23013); 宁波市自然科学基金(2009A610138).

第一作者: 王剑平(1960-), 男, 浙江临海人, 工程师, 主要研究方向: 钢结构与施工技术管理. E-mail: zejggbgs@mail.nbptt.zj.cn

\*通讯作者: 王新堂(1963-), 男, 陕西凤翔人, 教授, 主要研究方向: 钢结构与结构抗火. E-mail: wangxintang@nbu.edu.cn

## 1 试验方案

图 1 为 4 组方管柱与工字钢梁端板连接(分别记为 JD1、JD2、JD3、JD4)的构造详图. 钢梁、钢柱采用 Q235B, 螺栓为 16 锰钢, 均为 M8.8 级摩擦型高强螺栓. 端板与工字钢梁的连接均为熔透焊, 端板与方管柱则通过高强螺栓连接. 方管柱上均开设  $\Phi 100$  的手孔, 以方便现场安装.

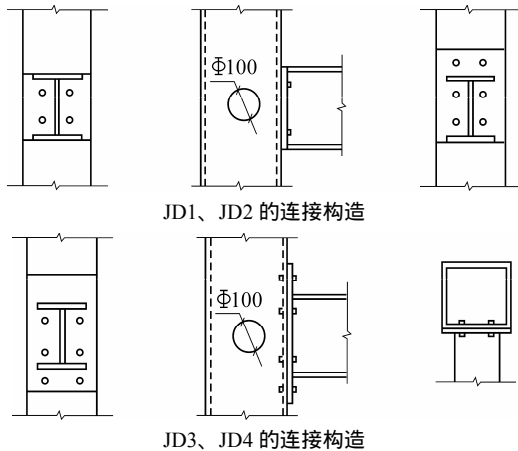


图 1 开孔方管柱与工字型钢梁的连接详图

充分考虑到半刚性连接几何参数和连接形式, 对具有工程背景和理论研究价值的 4 组试件 JD1~JD4 进行了静载试验研究. 试验加载如图 2 所示.

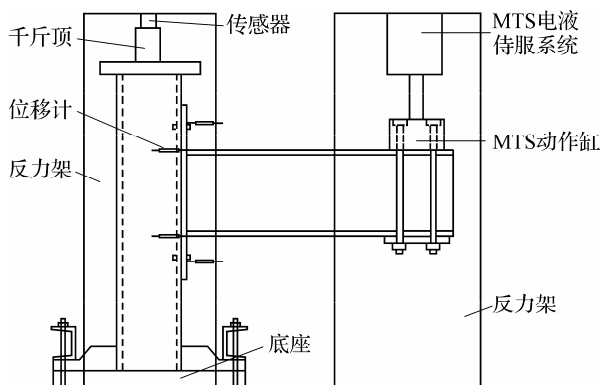


图 2 节点加载试验图示

试件底座设计了肋板抗剪, 并且用 2 块槽钢压在肋板上使柱底成为固定支座. 在柱上通过千斤顶施加不变的荷载, 轴向压力大约为  $0.2N_y$ , 其中  $N_y$  为柱的轴压屈服荷载, 计算所得为 150 kN. 并且在梁上贴应变片, 柱上贴三向应变花. 应变片型号均为 120-3AA.

## 2 有限元模拟分析

考虑到连接的对称性, 分析时采用了对称结构. 梁、柱材质为 Q235B 钢材, 屈服强度取实测平均值  $\sigma_y = 255$  MPa, 弹性模量为  $E = 2.07 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\nu = 0.3$ . 分析中所采用的高强螺栓等级为 8.8 级,  $f_y = 660$  MPa, 弹性模量取为  $E = 2.06 \times 10^5$  MPa. 梁的腹板、翼缘、端板、螺栓头、螺杆、螺母、方形柱均采用八结点各向同性的 SOLID45 实体单元, 采用非协调模式和完全积分, 并且沿厚度板方向定义为 2 层单元. 因为在整个加载过程中螺杆和螺栓头、螺母及其所接触的板件始终紧紧压在一起, 所以螺杆和螺栓头、螺母在接触的地方共用了结点, 而螺母与其接触的板件用耦合自由度的方法耦合了  $UX$ 、 $UY$ 、 $UZ$  方向的自由度. 建立有限元模型时, 都是通过体扫描和体延伸生成, 所以网格划分很规则. 螺栓头和螺母简化成圆形. 梁和端板采用共用结点的形式连接在一起, 不考虑梁和端板的焊接强度, 因为梁和端板采用全熔透焊接, 焊缝强度大于母材强度. 端板和柱的接触采用三维接触单元 CONTA174 和 TARGE170 柔体-柔体模拟, 以及扩展的拉格朗日乘法计算其接触, 接触单元 CONTA174 实常数  $FKN$  (法向接触因子) 定义为 1, 接触面的摩擦系数取实际摩擦系数的 0.45 倍. 螺栓的预紧力采用 PRETS179 单元来模拟, 施加的预紧力即为高强螺栓的预拉力设计值, M20 的 8.8 级高强螺栓设计值为 110 kN. 加载通过 2 个荷载步完成, 第 1 个荷载步施加螺栓预紧力, 第 2 个荷载步施加梁端位移. 由于分析时采用半对称结构, 所以在梁柱腹板的中线平面内, 施加对称性位移边界条件. 柱上下端施加固定端约束, 约束所有自由度, 对 SOLID45 单元即约束  $UX$ 、 $UY$ 、 $UZ$ , 这与实际试验中固定柱端是一致的.

利用 ANSYS 通用软件所构建的有限元模型进行模拟分析分别得到了各模型的应力分布云图(图 3, 应力单位均为 MPa).

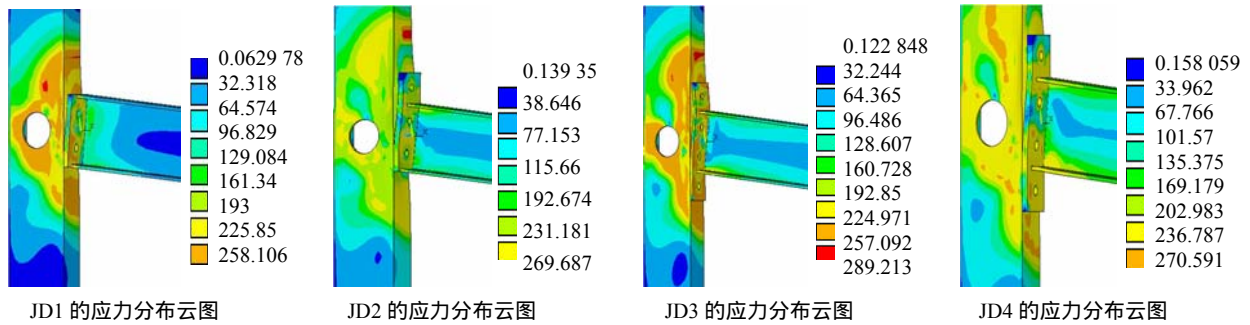


图 3 有限元分析的应力云图

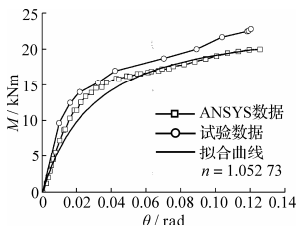


图 4 JD1 的  $M - \theta_r$  曲线

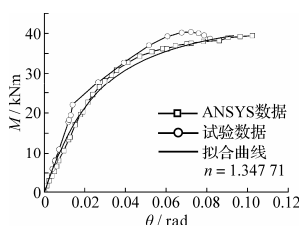


图 5 JD2 的  $M - \theta_r$  曲线

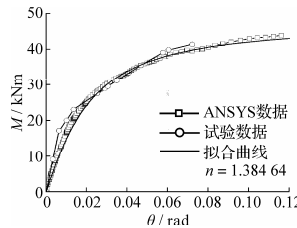


图 6 JD3 的  $M - \theta_r$  曲线

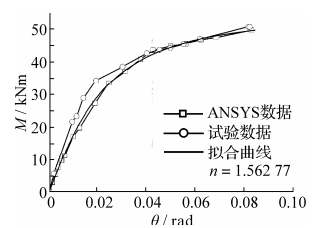


图 7 JD4 的  $M - \theta_r$  曲线

对比 JD1 和 JD2 可以看出, JD2 屈服时, 柱孔周围屈服区开始向下发展, 端板变形较大且屈服范围也较大; JD1 屈服时, 柱孔周围的屈服区几乎沿孔的上下区间对称分布, 端板变形虽然小但几乎全部屈服. JD3 屈服区成三角形分布, 远离节点处没有屈服, 而 JD4 柱孔周围基本上全都屈服; JD3 的端板变形较大, 但梁腹板屈服区较小, JD4 的端板屈服区较 JD3 小, 而梁腹板屈服区则较大.

### 3 有限元模拟曲线比较及数学拟合

按照笔者的试验方案得到了 4 组试件梁端处的  $M - \theta_r$  曲线, 且将结果与 ANSYS 有限元模拟分析结果进行比较(图 4~图 7). 而且, 为便于工程应用和整体结构分析, 进一步通过 Kishi 和 Chen 的幂函数模型对试验数据进行了拟合, 所采用的拟合模型为:

$$\theta_r = M / R_{ki} [1 - (M / M_u)^n]^{1/n},$$

其中,  $R_{ki}$  为连接初始刚度;  $M_u$  为连接的极限弯矩承载力;  $n$  为曲线的形状参数.

由图 4 可以得出 JD1 有限元模拟的  $M - \theta_r$  的初始刚度为  $856 \text{ kNm} \cdot \text{rad}^{-1}$ , 极限弯矩为  $25 \text{ kNm}$ . 从图中同时也可以看到, 有限元的  $M - \theta_r$  曲线的转折

点比试验的  $M - \theta_r$  曲线的转折点要提前, 有限元模拟的  $M - \theta_r$  曲线的初始刚度和极限弯矩均比试验数据大. 拟合曲线与试验数据吻合得较好, 参数  $n$  为 1.05.

由图 5~图 7 可得出节点 JD2、JD3、JD4 有限元模拟的  $M - \theta_r$  曲线初始刚度和极限弯矩分别为  $1285 \text{ kNm} \cdot \text{rad}^{-1}$ ,  $40 \text{ kNm}$ ;  $1705 \text{ kNm} \cdot \text{rad}^{-1}$ ,  $40 \text{ kNm}$  和  $1795 \text{ kNm} \cdot \text{rad}^{-1}$ ,  $50 \text{ kNm}$ . JD2、JD3 的有限元  $M - \theta_r$  曲线的转折点比试验的  $M - \theta_r$  曲线的转折点要提前, 而 JD4 则相当. 各节点 ANSYS 模拟的  $M - \theta_r$  曲线的初始刚度和极限弯矩均比试验数据大. 几组拟合曲线与试验数据均吻合得较好, 拟合参数  $n$  分别为 1.35、1.38 和 1.56.

综上所述, 有限元模拟数据与试验结果比较一致, 说明对于该类节点的  $M - \theta_r$  曲线可以通过有限元模拟分析给出与实际情况比较吻合的结果. 另一方面, 利用幂函数模型拟合笔者所讨论节点的  $M - \theta_r$  曲线也是可行的, 而且在相当大的转角范围内可与试验结果相当吻合.

### 4 开孔周围应力分布的试验结果

为更好地研究开孔后孔洞周围的应力变化情

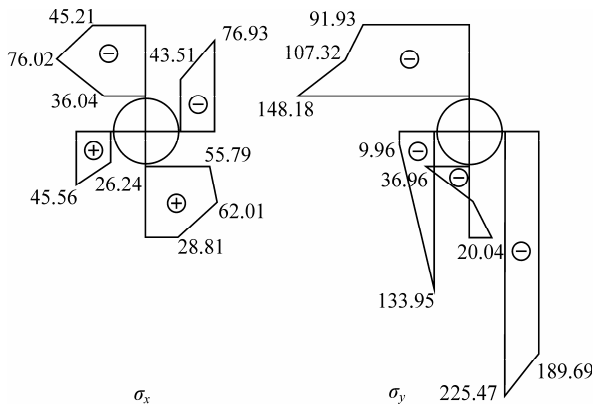


图8 JD1的柱孔周围极限状态的应力分布

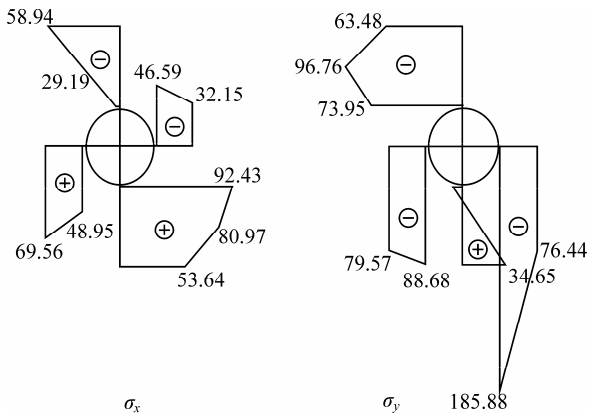


图10 JD3的柱孔周围极限状态的应力分布

况, 本试验同时得到了方管柱开孔周围应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  在极限状态的分布(单位 MPa), 对于4组节点的试验结果, 整理后的应力分布如图8~图11所示。

由上述结果不难看出, 对于所研究的端板连接而言, 在方管柱开孔后, 其周围的应力分布比较复杂, 但水平方向的应力  $\sigma_x$  在离孔边最近的地方通常并非最大(JD3 除外), 而在离开一段距离后往往较大。另外, 孔洞上下部位的水平应力分布规律明显不同, 且下部的  $\sigma_x$  均为拉应力, 表明此处的孔洞边缘处不宜有裂纹等缺陷, 上部应力(包括  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ )均为压应力。在孔洞的左右两边,  $\sigma_x$  基本上遵循左边受拉、右边受压的分布规律,  $\sigma_y$  则均为压应力, 而且数值较大。上述结果表明, 方管柱开孔后, 孔边应力分布虽然复杂, 且竖向应力的集中程度较大, 但均为压应力, 对结构安全性不会产生较大影响。另外需要注意, 这里所示的靠近孔洞边缘处的位置实际上并非完全边缘点, 而是离开了小

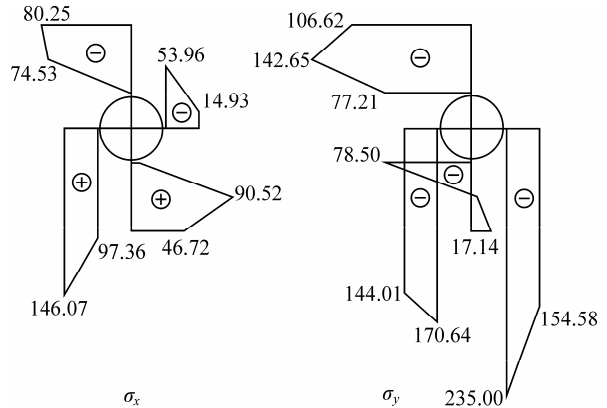


图9 JD2的柱孔周围极限状态的应力分布

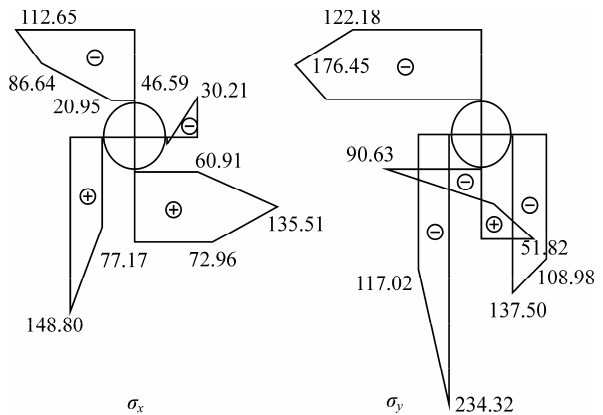


图11 JD4的柱孔周围极限状态的应力分布

段距离。但不管怎样, 在孔洞周围的应力突变还是比较明显的。

## 5 结论

(1) 试验研究所确定的1组  $M-\theta_r$  曲线可用于描述方管柱与工字型钢梁端板连接的力学特性。结果表明: 端板厚度的增加及外伸端板的连接螺栓至上下翼缘板距离的增加均会提高连接的初始刚度。且4组节点初始刚度分别为  $856 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ,  $1285 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ,  $1705 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ,  $1795 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 。

(2) 三维有限元模拟数据与试验结果比较一致, 说明对于该类节点的  $M-\theta_r$  曲线可以通过有限元模拟分析给出与实际情况比较吻合的结果。有限元模拟所确定的初始刚度通常大于试验结果, 但极限弯矩基本相同。

(3) 利用幂函数模型拟合所讨论节点的  $M-$

$\theta_r$  曲线是可行的, 而且在相当大的转角范围内与试验结果相当吻合. 所给出的  $M - \theta_r$  拟合曲线数学表达式也可以用于所研究节点的特性描述和整体结构分析中.

(4) 试验结果也同时表明, 方管柱开洞后对节点的整体承载力影响不大, 但考虑到孔洞下边缘应力分布的特征, 应避免孔洞下边缘的微裂纹等缺陷. 孔洞右边缘出现了明显的同号应力场, 且应力数值较大, 对受力不利, 此处也应注意开孔的制作质量.

#### 参考文献:

- [1] 郭兵, 顾强, 柳锋. 梁柱端板连接节点的滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(3):8-13.  
 [2] 施刚, 石永久, 王元清. 多层钢框架半刚性端板连接的

试验研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(3): 392-394.

- [3] 段祺成, 李凤霞, 刘署. H 型钢梁柱外伸端板螺栓连接节点的性能研究[J]. 洛阳工业高等专科学校学报, 2003, 13(1):18-19.  
 [4] 顾正维, 孙炳楠, 童根树. 螺栓角钢节点的三维非线性有限元分析[J]. 钢结构, 2003, 18(2):48-52.  
 [5] Krishnamurthy N, Graddy D E. Correlation between 2- and 3-dimensional finite element analysis of steel bolted end-plate connections[J]. International Journal of Computers and Structures, 1976, 6(4/5):381-389.  
 [6] Mao C, Ricles J, Lu L W, et al. Effect of local details on ductility of welded moment connections[J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(9):1036-1044.  
 [7] Chen W F. Steel beam-to-column building connections [M]. New York: Elsevier Science Publishing, 1998.

## Experimental Analysis on FEM of Connections Between Rectangular Hollow Steel Column and H-type Beam

WANG Jian-ping<sup>1</sup>, WANG Xue-jiao<sup>2</sup>, WANG Xin-tang<sup>2\*</sup>

( 1.Steel Construction Co. Ltd. 2nd Construction Group, Ningbo 315207, China;

2.Faculty of Architectural Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** Based on the connections between rectangular hollow steel columns with opening and H-type beams used in engineering, experimental analysis on FEM of a set of the connections is put forward in this paper. The results of experimental study for  $M - \theta_r$  curves and distribution of stress around the opening of the column are obtained together, which can be used as the basis for evaluating the mechanical properties of the connections of interest. The experimental results show that enlarging thickness of the endplate and the distance between flange and the bolts out of flange of the beam will increase the initial stiffness of the connections. The fitting curves of  $M - \theta_r$  in the experimental results are obtained through analysis of the results based on FEM and experimental results. The feasibility of modeling the  $M - \theta_r$  curve of the connections with the power function is validated, which is well in agreement with the experimental results, thus can be used as mathematical basis for the real-world connections.

**Key words:** rectangular hollow tube with opening; semi-rigid connections; modeling on FEM; mathematic fitting

**CLC number:** TU391; TU317

**Document code:** A

(责任编辑 章践立)