

钢框架端板节点力学性能的数值模拟探讨

文天鹏, 史艳莉, 王文达

(兰州理工大学 a.土木工程学院; b.西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 钢框架梁柱连接节点的力学性能直接影响结构的整体工作性能。本文对多高层框架结构中应用较多的螺栓端板连接节点的力学性能进行了数值模拟, 采用 ABAQUS 建立了其理论分析模型, 探讨了三维有限元建模过程中端板节点的单元选取、螺栓预紧力、接触模拟等关键技术。数值模拟结果与试验结果总体上吻合较好。本文结果可为进一步建立此类节点力学性能的数值模型和实用计算方法提供参考。

关键词: 钢框架; 端板节点; 力学性能; 数值模拟

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2008)04-0317-04

钢框架因其良好的抗震性能, 在地震区的多高层建筑中得到了广泛的应用。而螺栓端板连接作为一种应用广泛的钢框架梁柱连接形式, 尤其是在 Northridge 地震和日本阪神地震中焊接节点遭受严重破坏后, 螺栓端板连接节点受到了新的重视。螺栓端板连接节点属于半刚性节点^[1]。螺栓端板节点主要由端板、螺栓、节点域和加劲肋等部分组成。与焊接节点相比, 螺栓端板连接节点施工方便, 抗震性能好, 在多层钢框架结构中得到推广使用。

但该类节点的构造特点也决定了其刚度特征为半刚性, 受力性能复杂, 结构内力的分布会随着节点刚性的不同而不同, 精确的设计较为繁琐。国内外研究者对端板节点的力学性能的试验研究和理论分析成果较多^[2-8], 如欧洲规范 EC3^[7]中就提供了半刚性节点的设计方法可适用于端板连接节点, 而美国标准 ANSI/AISC358-05^[8]也给出了端板节点的相关设计方法, 相比之下, 国内设计规范中尚缺乏系统的分析和设计方法。

本文主要提供一种此类节点的数值模拟方法, 以明晰螺栓端板连接节点的受力性能, 为进一步研究该类节点的破坏模式及半刚性特征等力学性能和有关工程应用提供参考。

1 数值模拟模型

1.1 材料模型

采用 ABAQUS 软件^[9]进行螺栓端板节点的数值模拟。钢材在单调荷载下, 采用等向强化法则和相关流动法则。对于建筑工程中常用的低碳软钢, 钢材的应力-应变关系曲线采用二次塑流模型, 高强钢材则选用双线性强化模型, 强化段的模量可取为 $0.01E_s$, E_s 为钢材的弹性模量。对于本文节点试件, 除高强螺栓采用双线性强化模型外, 其它钢材均采用二次塑流模型。

1.2 有限元建模

有限元建模时螺栓端板连接节点的边界条件及荷载依照文献[10]的试验来模拟, 在 ABAQUS 建模时进行如下处理: 柱顶及柱底均采用铰接, 在 ABAQUS 中采用约束柱底或柱顶垂直于梁柱平面的中线的平动自由度; 柱顶施加恒定的轴向荷载, 梁端施加垂直向下的荷载或位移。

节点构件共有三类荷载: 螺栓预紧力、柱顶轴向荷载以及梁端垂直荷载, 在 ABAQUS 中将这三类荷载分三个分析步分别施加: 在第一分析步中可以通过施加螺栓荷载 (Bolt load) 来完成对螺栓预拉力的模拟。在第二个分析步中在柱顶施加轴向荷载, 荷载大小依据试件试验中实际轴力大小施加。荷载类型为集中力荷载 (Concentrated force), 为使得荷载传递均匀, 竖向荷载施加到加载端板上。加载端板应为不可变形的弹性材料, 处理方法如下: 加载端板定义为弹性材料, 弹性模量 $E = 10^{12}$ N/mm², 泊松比为 $\mu=0.0001$ 。在第三个分析步中, 在梁端施加竖

收稿日期: 2008-06-25

作者简介: 文天鹏 (1980-), 男, 湖北天门人, 硕士研究生, 研究方向为钢结构, wtp2006@163.com。

基金项目: 甘肃省高等学校研究生导师科研项目计划 (0703B-05); 兰州理工大学博士基金。

向荷载,由于要得到节点的弯矩-转角全曲线及曲线的下降段,故采用位移加载。端板节点的有限元模型、边界及荷载条件如图1所示。

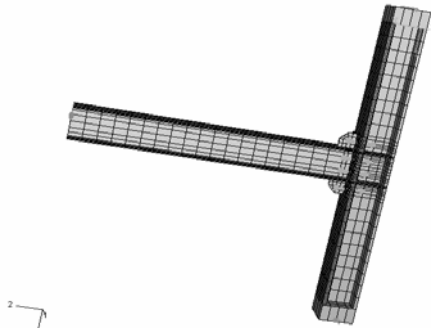


图1 节点的有限元模型

为能合理准确地模拟节点的力学性能,对梁、柱、端板、螺栓、加劲肋都选用了三维实体单元建模,有限元模型的网格划分采用映射自定义网格划分,在网格划分时候对受力复杂的节点区域进行了部件分割以及网格细化处理,如图2所示。

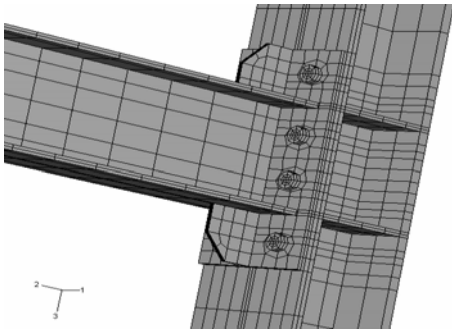


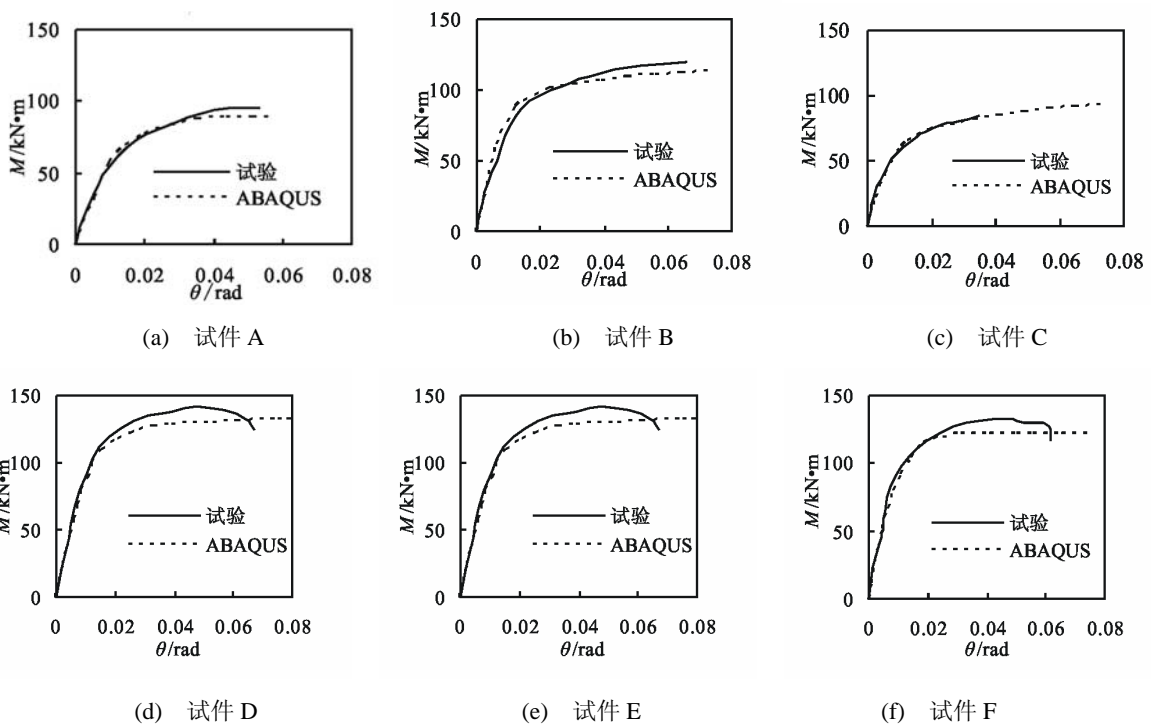
图2 节点的局部网格细化

模型中所有单元全部采用8节点缩减积分格式的三维实体单元(C3D8R)模拟。端板节点的

有限元模型中接触关系较多,接触界面模型的处理是合理模拟螺栓端板节点力学性能的关键。端板节点中接触关系包括端板与螺帽、端板与螺杆、柱翼缘与螺杆、柱翼缘与螺帽、端板与柱翼缘等之间的接触,除了螺杆与螺栓孔壁之间的接触存在初始间隙外,其余初始状态均接触。本文对于接触的处理为界面法向方向采用硬接触,切向方向采用库伦摩擦模型,摩擦系数按GB50017-2003《钢结构设计规范》^[11]在喷砂情况下取0.45。所有的接触均定义为有限滑动,且考虑0.02的位置误差限度的接触模型。在本文节点构件中,除节点各组成部件之间的界面接触外,还存在钢材间的焊接关系,如钢梁与端板、加载端板与柱,端板加劲肋与梁和端板、柱加劲肋与柱等。当考虑焊缝至少等强原则的前提下,采用自由度耦合来模拟可取得良好的效果,本文在ABAQUS中采用约束命令(Constraint)中的绑定约束(Tie),将接触面处的共用节点的自由度完全耦合起来用以模拟焊接连接。

1.3 模型校验

为验证本文材料模型、界面接触模型及单元类型对分析螺栓端板连接节点的适用性,对郭兵等(2002)^[10]中的8个螺栓端板连接试验试件进行了有限元数值模拟。理论计算结果和试验结果对比如图3,可见用理论分析得到螺栓连接节点的弯矩-转角全过程曲线与试验骨架曲线吻合良好。从而验证了材料模型、界面接触模型及单元类型选取的正确性。



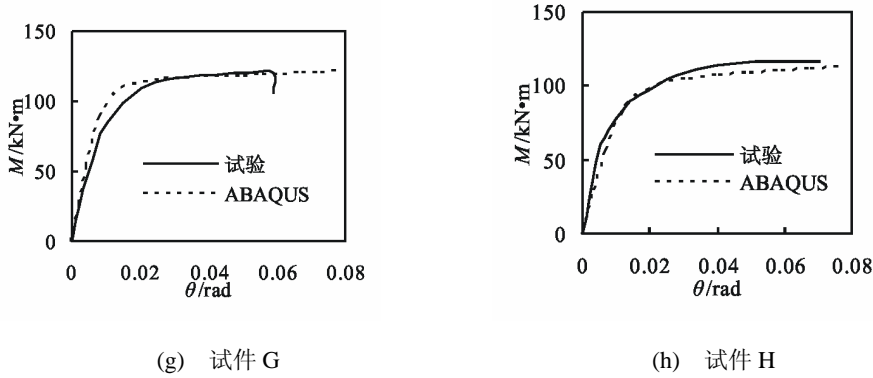


图 3 文献[10]数值模拟结果与试验结果的对比

1.4 典型破坏模式分析

数值模拟得到的端板节点的变形和破坏模式与文献[10]中的试验现象基本一致。为便于分析，选取了文献[10]中试件 E 的理论分析破坏模式为例说明，分别如图 4(a)~(d)所示。该试件的梁端出现了塑性铰破坏模式。

由图 4(a)可见试件 E 节点在达到极限状态承载力时梁端端板加劲肋处的上下翼缘已经发生了很明显的变形，并且从图 4(d)的应力分布来看塑性铰在梁端已经形成。从图 4(a)的节点应力分布来看，除梁端变形比较大外，还可以看到在端板

加劲肋与梁翼缘连接处发生了明显应力集中。由于在柱的节点域内设置了横向加劲肋，虽然节点域的应力较大，但加劲肋对柱腹板和翼缘起到了较好的约束作用，使节点域的刚度有较好的提高，从而节点域变形不很明显。由图 4(b)可见梁受拉翼缘两侧的螺栓受力较大，但只是螺栓部分接触部位发生了屈服，总体上还是处在弹性工作阶段。由图 4(c)可见在梁的受拉翼缘与端板连接处、受拉翼缘两侧的螺栓孔周围和受压翼缘与端板连接处是端板应力分布比较集中的地方。由于端板厚度较厚，刚度较大，因此端板变形不是很明显。

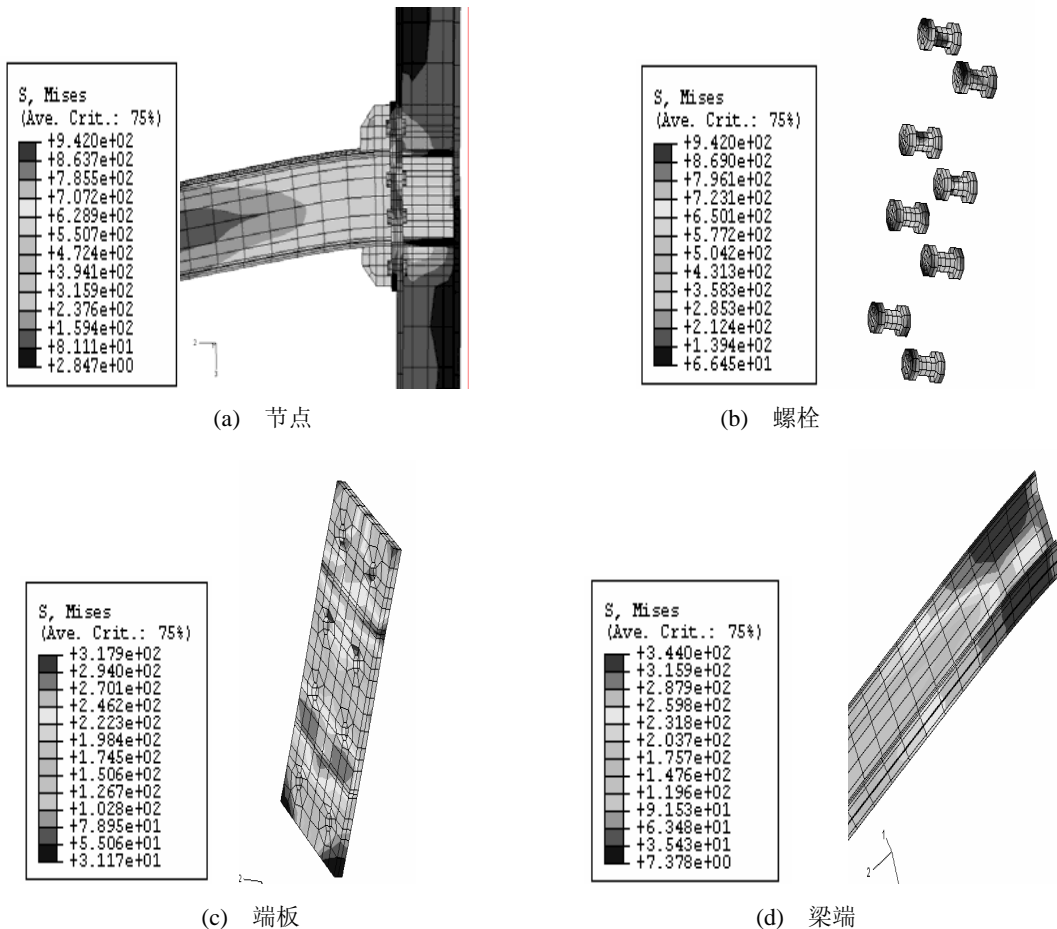


图 4 试件 E 的应力云图

2 结论

采用 ABAQUS 软件对钢框架梁柱螺栓端板节点进行了数值模拟, 考虑了螺栓预紧力、所有接触面的模拟等, 理论计算结果与试验结果总体上吻合良好。基于对文献[10]中节点试件的全过程数值模拟, 分析了柱腹板和翼缘尺寸、端板厚度、端板加劲肋及柱腹板加劲肋等因素对螺栓端板连接节点性能的影响。基于以上分析有以下结论供参考:

(1) 在梁翼缘对应处设置柱腹板横向加劲肋可延缓腹板和翼缘发生局部屈曲, 同时也提高了节点的承载力。

(2) 柱翼缘、腹板厚度和端板厚度越厚, 节点承载力和刚度越大, 但变形能力有所降低。应在保证强柱弱梁和强节点设计原则的前提下, 尽量使塑性铰在梁端形成, 以保证节点的抗震能力。

(3) 框架梁与端板连结处部位应力集中较为明显, 应保证该区域的合理设计, 并采取合理的构造措施。

参 考 文 献

- [1] Chen W F, Lui F M. Stability Design of Steel Frames[M]. Boca Raton (FL): CRC Press, 1991.
- [2] 施 刚, 石永久, 王元清, 等. 多层钢框架半刚性端板连接的试验研究[J]. 清华大学学报, 2004, 44(3): 391-394.

- [3] Shi Y J, Chan S L, Wong Y L. Modeling for Moment-Rotation Characteristics for End-plate Connections[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1996, 122(11): 1300-1306.
- [4] Kukreti A R, Murray T M, Abolmaali A. End-plate Connection Moment-Rotation Relationship [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1987, 8: 137-157.
- [5] 王 燕, 彭福明. 钢框架梁柱半刚性节点在循环荷载作用下的试验研究[J]. 工业建筑, 2001, 31(12): 55-57.
- [6] 陈 宏, 施龙杰, 王元清, 等. 钢结构半刚性节点的数值模拟与试验分析[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 102-106.
- [7] Eurocode 3. BS EN 1993-1-8: 2005. Design of Steel Structures-Part 1.8 Design of joints[S].
- [8] ANSI/AISC 358-05. Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications[S].
- [9] Hibbit, Karlson & Sorensen Inc. ABAQUS/Standard User 's Manual, Version 6.5[M]. Providence (RI): Hibbit, Karlsson, & Sorensen, Inc.; 2005.
- [10] 郭 兵, 顾 强. 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(6): 8-13.
- [11] GB 50017-2003, 钢结构设计规范[S].

Discussion on Numerical Simulation of Mechanical Performance of Steel

End-plate Connections

WEN Tian-peng, SHI Yan-li, WANG Wen-da

(a. School of Civil Engineering; b. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The behaviors of steel frames are affected by the performance of beam to column joints. In this paper, the mechanical performances of the common end-plate connections were simulated by ABAQUS. Some key technologies, such as element selection, preload of bolts, contact between bolts and end-plate, and so on, were discussed based on the three-dimension finite element model. The numerical results are matched well with the experimental results. The results are reference to simulate the performance in detail and develop practical design method of this type joints.

Key words: steel frame; end-plate connection; mechanical performance; numerical simulation