

钢框架梁柱外伸式端板连接的非线性有限元模拟

李艳娇¹, 李瑞敏²

(1. 沈阳城市建设学院, 辽宁 沈阳 110167; 2. 华晨宝马汽车有限公司, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 钢框架梁柱外伸式端板连接作为一种典型的半刚性连接方式, 其受力性能较为复杂。为全面了解该连接方式下的受力特性, 采用 ANSYS Workbench 软件建立有限元分析模型, 在考虑材料非线性、几何非线性、状态(接触)非线性的情况下, 分析连接节点在高强度螺栓预紧力及竖向位移荷载作用下的受力性能。研究结果表明: 1) 在预紧力作用下, 螺栓与端板的接触压力集中分布在螺栓孔的周边, 分布面积约为螺栓杆截面面积的 10 倍; 2) 设置柱腹板加劲肋及端板加劲肋是外伸式端板连接节点必不可少的构造措施; 3) 受拉区高强度螺栓受到较大的拉力和剪力, 受压区螺栓在弹塑性阶段也会承受较大的剪力。本文成果可为钢框架梁柱外伸式端板连接的分析与设计提供一定的借鉴与参考。

关键词: 梁柱连接; 外伸式端板; 高强度螺栓; 有限元分析

中图分类号: TU391

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)03-0034-05

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.03.034

Nonlinear finite element modeling of extended end-plate connection in steel frame beam-column

LI Yanjiao¹, LI Ruimin²

(1. Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110167, Liaoning, China;

2. BMW Brilliance Automotive Co., Ltd., Shenyang 110044, Liaoning, China)

Abstract: As a typical semi-rigid connection method, the extended end-plate connection of steel frame beam-column has complex mechanical properties. In order to fully understand the force characteristics of the connection mode, ANSYS Workbench software is used to establish a finite element analysis model, and the mechanical performance of the connection joint under the action of high-strength bolt preload and vertical displacement load is analyzed under the consideration of material nonlinearity, geometric nonlinearity and state (contact) nonlinearity. The results show that: 1) Under the action of preload, the contact pressure between the bolt and the end-plate is concentrated around the bolt hole, and the distribution area is about 10 times of the cross-sectional area of the bolt rod; 2) Setting the column web stiffener and the end-plate stiffener is an indispensable structural measure for the extended end-plate connection joint. 3) The high-strength bolt in the tension zone is subjected to greater tensile and shear force, and the bolt in the compression zone will also bear greater shear force in the elastoplastic stage. The results can provide some references for the analysis and design of steel frame beam-column extended end-plate connection.

Key words: beam-column connection; extended end-plate; high-strength bolt; finite element analysis

钢框架结构梁柱节点主要采用高强度螺栓摩擦型连接。根据构造和刚度的不同, 节点可以分

为刚性连接、铰接和半刚性连接几种方式。从施工难易程度来说, 刚接施工难度最大, 半刚性连

收稿日期: 2023-05-18

作者简介: 李艳娇(1982—), 女, 讲师, 从事结构工程的力学分析及优化设计工作。

接次之, 铰接最小; 从抗震性能方面来说, 半刚性连接最好, 半刚性连接次之, 铰接最差。综合来看, 半刚性连接兼具刚性连接和铰接的优点^[1], 在我国得到了广泛应用。外伸式端板连接作为钢框架的一种典型半刚性连接方式^[2], 其节点主要由梁柱节点域、外伸端板、高强度螺栓、加劲肋等部件组成^[3]。与刚性节点和铰接节点相比, 半刚性节点受力性能更加复杂。目前, 针对外伸端板梁柱节点, 国内外规范均将其简化为 T 形件计算模型, 并给出了 T 形受拉接头的设计方法^[4], 但公式较为复杂, 且涉及的计算参数较多。刘秀丽等^[4]认为, 由于撬力的复杂性, 各国规范的 T 形件承载力计算结果与试验结果均存在较大误差。目前国内外学者主要针对 T 形件的受拉性能展开试验和有限元研究, 如: 陈潘等^[5]对高强钢 T 形件的单向受拉性能进行了试验及有限元研究, 发现翼缘厚度是影响 T 形件受拉力学性能的关键; 刘秀丽等^[6]对 T 形件中高强螺栓的受力性能进行了试验及有限元研究, 发现翼缘板厚度和螺栓直径是影响螺栓受力性能的主要因素; 袁焕鑫等^[7]对 T 形件螺栓连接的承载力性能进行了试验研究, 发现国内外规范的计算结果均较保守, 有必要对 T 形件螺栓连接的设计方法开展深入研究。本文采用有限元软件 ANSYS Workbench 建立钢框架外

伸端板梁柱节点的精细化模型, 在充分考虑材料非线性、几何非线性、状态(接触)非线性的情况下, 对节点进行全面的受力分析, 以期为该节点的研究及设计提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 构件尺寸及材料本构

梁柱连接节点尺寸及加载示意如图 1 所示, 钢柱高度为 2 000 mm, 钢梁长度为 1 200 mm。梁、柱均为焊接工字形钢, 钢梁规格为 H300 mm × 200 mm × 8 mm × 12 mm, 钢柱规格为 H300 mm × 250 mm × 8 mm × 12 mm。柱翼缘在端板高度范围内局部加厚, 厚度与端板厚度相同, 均为 20 mm。梁柱钢材均采用 Q345B 制作, 材料本构采用理想弹塑性模型, 屈服强度结合材料性质试验结果进行取值, 即板厚不大于 16 mm 时, 钢材屈服强度为 391 MPa, 弹性模量为 190 707 MPa; 当板厚大于 16 mm 时, 钢材屈服强度为 363 MPa, 弹性模量为 204 227 MPa。螺栓采用 10.9 级摩擦型高强度螺栓, 直径为 20 mm。高强度螺栓材料应力 - 应变关系采用三折线模型, 如图 2 所示。所有材料均为各向同性材料, 泊松比均为 0.3, 密度为 7 850 kg/m³, 采用 Von Mises 屈服准则, 材料屈服后采用流动理论。

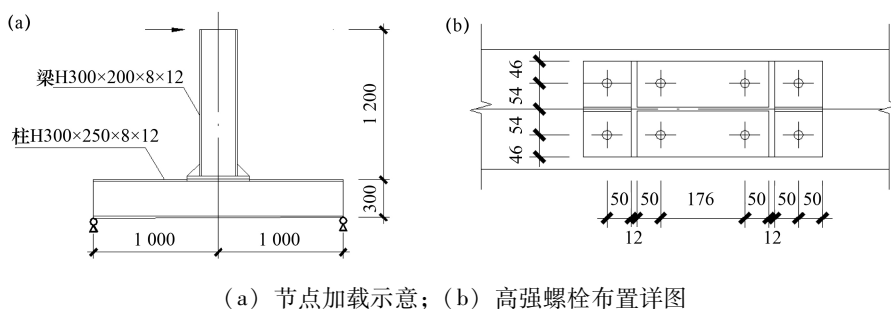


图 1 节点尺寸及加载示意

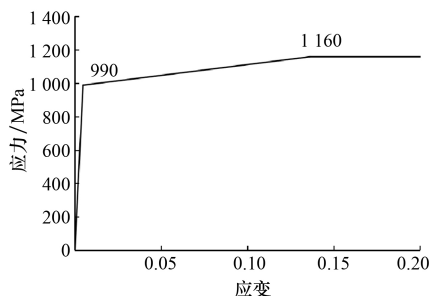


图 2 高强度螺栓材料应力 - 应变关系

1.2 单元选择及网格划分

所有构件均采用实体单元建模。由于钢板厚度、材料性质不同, 局部加厚的翼缘和其余部分钢柱分为两个构件进行建模, 在组装时将二者设为绑定接触。钢梁和端板作为一个构件建模, 螺帽、螺母及螺杆作为一个构件建模。网格类型以六面体网格为主, 网格尺寸按由大到小的原则, 确定采用最后一次划分的网格尺寸, 当两次划分

mm

所得计算结果的差值小于 5% 时即停止。经试算, 确定梁柱最大网格尺寸为 10 mm, 高强螺栓的最大网格尺寸为 5 mm。梁柱节点和螺栓的有限元模型如图 3 所示。

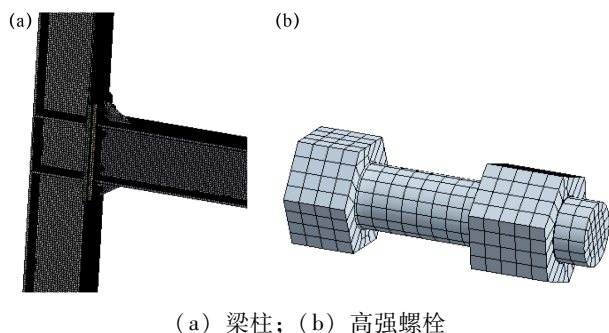


图 3 构件有限元模型

1.3 边界条件及荷载施加

节点的边界条件为约束柱端的位移, 接触位置有柱翼缘与端板、螺帽与柱翼缘、螺母与端板。接触类型为摩擦接触, 摩擦系数为 0.44。M20 高强螺栓的预紧力设计值为 155 kN。节点受力荷载分析步骤: 1) 用软件的 Bolt pretention 命令施加螺栓预紧力(图 4); 2) 锁死螺栓预紧力并在梁端施加竖向位移荷载(最大位移为 100 mm), 使材料进入弹塑性阶段。

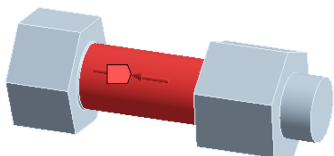


图 4 高强螺栓预紧力

2 计算结果分析

2.1 预紧力作用下节点受力分析

2.1.1 螺栓受力分析

高强度螺栓在安装时, 通过特制的扭矩扳手拧紧螺帽, 使螺杆产生很大的预拉力, 同时被连接的板件会受到较大的压力而被夹紧。各排高强度螺栓的预拉力相同, 螺杆在预紧力作用下可视为均匀受拉, 其 Von Mises 应力云图如图 5 所示。由图 5 可知: 有限元计算的应力值与理论计算值相一致, 螺栓预拉力的有限元模拟是合理的。建模时, 将螺母与螺杆视为一个整体, 并未考虑螺纹及螺母与螺杆之间的相互作用, 因此在螺栓杆与螺母接触的边角位置存在应力集中现象。

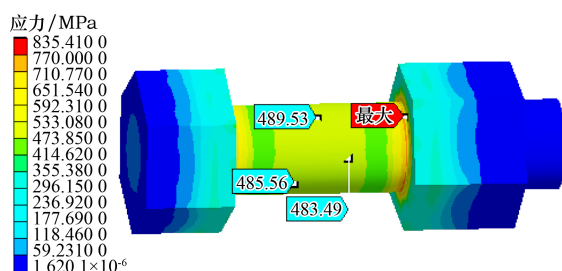


图 5 预紧力作用下螺栓的 Von Mises 应力云图

2.1.2 端板受力分析

图 6 为预紧力作用下的端板 Von Mises 应力云图。由图 6 可知: 螺栓与端板的接触压力集中分布在螺栓孔的周边, 分布面积约为螺栓杆截面面积的 10 倍。这一结果对于外伸式端板连接节点的受力分析及理论计算公式的建立具有参考意义。越靠近螺栓孔应力越大, 孔边缘有应力集中现象。

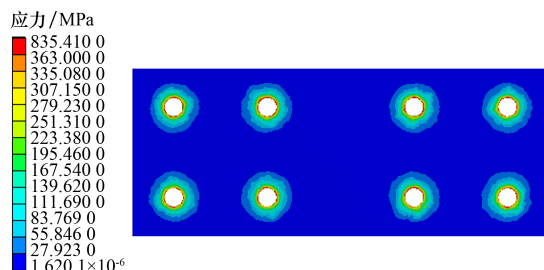


图 6 端板 Von Mises 应力云图

2.2 外荷载作用下节点受力分析

2.2.1 梁柱受力分析

图 7 为节点加载点处的竖向力 - 位移曲线。由图 7 可知: 在位移荷载较小时, 力和位移成线性关系; 随着位移荷载的增大, 位移的增加速度大于力的增加速度, 说明材料逐渐进入弹塑性阶段, 结构的承载力降低。

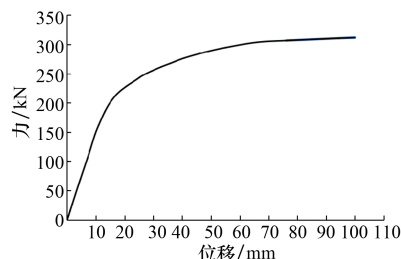


图 7 力 - 位移曲线

在梁端施加竖向位移荷载后, 节点域受到剪力和弯矩的共同作用而最先达到屈服。图 8 为竖向位移荷载加至 50 mm 时的梁柱 Von Mises 应力云图。由图 8 可知: 节点域大部分区域已经屈服, 属于主要的耗能区域。设计时, 应加强节点域柱

腹板局部稳定性验算,采取设置柱腹板加劲肋等有效构造措施,防止柱腹板的局部屈曲,增强结构的耗能能力。梁端板加劲肋也有部分屈服,说明端板加劲肋在节点受力时也发挥了较大的作用,所以设计时,建议设置端板加劲肋。

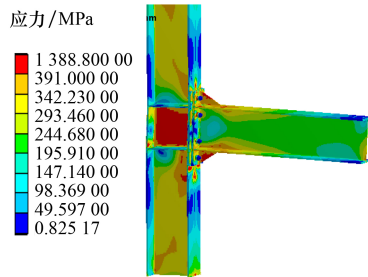
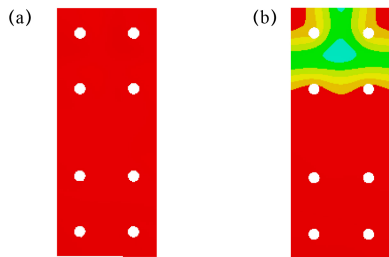


图 8 梁柱 Von Mises 应力云图

图 9 为弹性阶段与弹塑性阶段端板与柱翼缘间的间隙图,其中红色区域表示间隙为 0。由图 9 可知:在弹性阶段,端板与柱翼缘始终紧密接触,间隙为 0,说明在高强度螺栓摩擦型连接弹性阶段设计时,板件始终不分离,利用板件间的摩擦力传递剪力的设计假定是合理的。进入弹塑性阶段后,端板受拉区与柱翼缘分离,受力区域集中在梁受拉翼缘周边且呈 T 形,这也说明,将外伸式端板连接节点简化为轴心受拉的 T 形件研究是合理的。



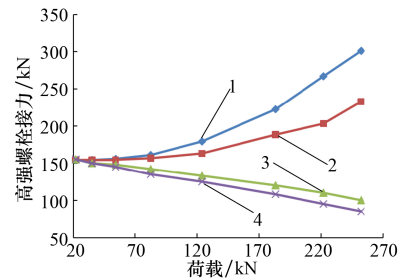
(a) 弹性阶段; (b) 弹塑性阶段

图 9 端板与柱翼缘的间隙

2.2.2 高强度螺栓受力分析

在相同的预紧力作用下,各个螺栓均受到相同的拉力。当节点进一步受到弯矩作用时,受拉区高强度螺栓的拉力会进一步增大,而受压区的螺栓的拉力会减小。图 10 为高强度螺栓的轴拉力与荷载的关系曲线,其中第一~四排为由节点受拉区至受压区螺栓排序。由图 10 可知:第一排螺栓受到的拉力最大,这与有限元计算结果、理论分析及文献[8]试验结果相一致。节点进入弹塑性阶段后,受拉螺栓的拉力会远大于螺栓的预拉力。因此,抗震设计的钢框架梁柱外伸式端板连接节点

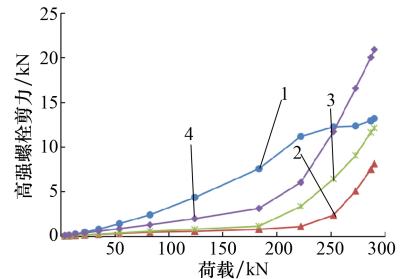
应注意验算大震下螺栓的受力,以避免其发生突然断裂而导致结构的倒塌。



1—第一排; 2—第二排; 3—第三排; 4—第四排。

图 10 高强度螺栓拉力-荷载曲线

图 11 为高强度螺栓剪力与荷载的关系曲线。由图 11 可知:各排螺栓的剪力大小各不相同,第一、四排螺栓的剪力大于第二、三排螺栓的剪力。然而,当前设计普遍以各排螺栓剪力相同进行假设,说明设计还存在优化、细化的空间。在外荷载较小时,各排螺栓的剪力均较小;随着荷载的增大,第一排螺栓的剪力增长速度最快,第二排的剪力增长速度最慢。当第一排螺栓进入屈服阶段后,其余螺栓的剪力开始急剧增大,第四排螺栓的剪力会超过第一排螺栓的剪力。设计时应注意验算各排螺栓的剪力,以保证其安全。



1—第一排; 2—第二排; 3—第三排; 4—第四排。

图 11 高强度螺栓剪力-荷载曲线

图 12 为结构在竖向位移为 50 mm 时的高强度螺栓 Von Mises 应力云图。由图 12 可知:受拉区螺栓杆中部部分区域已经屈服,第一排螺栓的屈服区域大于第二排螺栓,说明受拉区的螺栓受力不均匀。

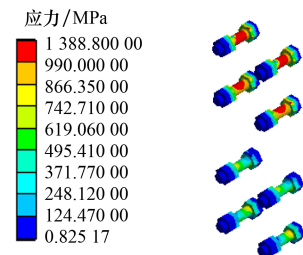


图 12 高强度螺栓 Von Mises 应力云图

3 结 论

本文通过建立钢框架结构梁柱外伸式端板连接的非线性有限元分析模型,对节点在弯矩和剪力作用下的受力状态进行了计算分析,得到结论如下。

(1) 有限元软件 ANSYS Workbench 可以精确地模拟螺栓的预紧力,适用于钢框架结构梁柱节点的精细化有限元分析。

(2) 在预紧力作用下,螺栓与端板的接触压力集中分布在螺栓孔的周边,分布面积约为螺栓杆截面面积的 10 倍,此结果可以为更好地进行该节点的受力分析与设计提供参考。

(3) 节点域柱腹板及端板加劲肋是节点受力时最先屈服的部位,起到耗能元件的作用,柱腹板加劲肋及端板加劲肋设置是该节点必不可少的构造措施。

(4) 各排高强度螺栓在弹性阶段主要承受轴向拉力,剪力较小;进入弹塑性阶段后,受拉区最外排螺栓除了承受较大的轴向拉力外,还承受较大的剪力、弯矩,受压区最外排螺栓的剪力会超过受拉区螺栓剪力,在设计计算时应考虑这种

螺栓的复杂受力状况。

参考文献:

- [1] 王燕,彭福明. 多高层钢框架梁柱半刚性连接性能[J]. 建筑结构,2000,30(9):18-20.
- [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(自然科学版),2004,44(3):391-394.
- [3] 钢结构高强度螺栓连接技术规程:JGJ 82—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [4] 刘秀丽,曾明,王燕. 高强螺栓 T 形件受拉连接设计方法研究[J]. 建筑钢结构进展,2023,25(2):23-30.
- [5] 陈潘,高飞,万君如,等. 高强钢 T 形件单向受拉力学性能试验及有限元研究[J]. 建筑钢结构进展,2022,24(5):40-50.
- [6] 刘秀丽,王燕,李美红,等. 钢结构 T 形连接高强度螺栓受力分析及数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报,2016,33(2):63-70.
- [7] 袁焕鑫,胡松,杜新喜,等. 锈钢 T 形件螺栓连接承载性能试验研究[J]. 工程力学,2019,36(2):215-222.
- [8] 施刚,石永久,王元清,等. 端板连接高强度螺栓受力特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2004,34(3):375-378.