

圆钢构架关键节点半刚性研究

钱明杰

安徽省建筑工程质量第二监督检测站 安徽合肥 230000

摘要: 构架结构在输变电设备中使用广泛, 既为设备提供强度支撑, 又给设备提供较大使用空间, 但在使用过程中关键节点易产生刚度破坏, 其强度与刚度安全不容忽视。本文基于 ABAQUS 软件建立了构架结构关键节点的力学模型和有限元模型并对其进行验证, 推导关键节点弹性刚度方程, 同时开展非线性分析获得关键节点的弯矩转角曲线和应力应变云图, 提出两种工况下结构的优化增强措施, 最后将其应用于构架整体结构的静力分析研究节点的半刚性效应。结果表明: 螺栓个数、插板型式对节点的初始转动刚度有较大影响, 采用增加螺栓个数和改变节点板、插板厚度和钢管截面尺寸等有效措施提高关键节点承载力。结构优化后两种工况结构最大应力比优化前分别增加 28.1% 和 27.2%, 极限荷载分别增加 15.4% 和 14.5%。

关键词: 构架节点; 刚度方程; 结构优化; 半刚性效应; 承载能力

Research on the semi-rigidity of key nodes of circular steel frames

Qian Mingjie

The Second Supervision and Inspection Station of Construction Engineering Quality of Anhui Province, Hefei 230000

Abstract: Frame structures are widely used in power transmission and substation equipment, providing both strength support and space for the equipment, but the key nodes are prone to stiffness damage during use, and their strength and stiffness safety should not be neglected. This paper establishes and verifies the mechanical model and finite element model of the key nodes of the frame structure based on ABAQUS software, derives the elastic stiffness equations of the key nodes, and carries out non-linear analysis to obtain the bending moment angle curve and stress-strain cloud diagram of the key nodes, and proposes optimization enhancement measures for the structure under two operating conditions. Finally, it is applied to the static analysis of the overall structure of the frame to study the semi-rigidity effect of the nodes. The results show that the number of bolts and the type of inserts have a significant effect on the initial rotational stiffness of the nodes, and effective measures such as increasing the number of bolts and changing the thickness of the node plates, inserts and steel tube cross-sectional dimensions are used to improve the load carrying capacity of the critical nodes. The maximum stresses in the two working conditions increased by 28.1% and 27.2% respectively, and the ultimate loads increased by 15.4% and 14.5% respectively, compared with those before the optimization.

Keywords: frame nodes; stiffness equation; structural optimization; semi-rigid effect; load carrying capacity

引言

构架结构在输变电体系中起着支撑导线和设备等作用, 其节点的安全性至关重要。关键节点失效将改变结构传力路径, 导致构件丧失部分或全部承载能力和结构体系的局部破坏, 严重的甚至可能造成整个结构体系连续性坍塌, 直接影响到构件及结构的安全性和可靠性。

基于此, 国内外专家学者对构架结构的关键节点半刚性问题进行了一系列研究。翟彬^[1]等人开展了 1000 kV 特高压构架节点半刚性非线性分析及其对构架力学性能的影响研究。宋小卫^[2]基于拉弯单调静力试验和 ABAQUS 有限元模拟对钢管混凝土法兰节点中法兰板厚度、加劲肋高度以及螺栓边距进行了参数分析。钱程^[3]通过有限元模型研究了钢构件节点的半刚性特性对输电塔自振特性和风致响应的影响。焦安亮^[4]提出了一种连接 K 形节点计算模型和计算方法并通过试验验证该方法的适用性。马康^[5]采用 SAP 2000 对刚节点和半刚节点进行非线性动力弹性时程分析。Liu^[6]针对具有半刚性连接的多层钢架提出了一种两阶段的结构优化方法。Zhang^[7]提出了一种半刚性连接钢架预制阻尼墙板填充物, 研究其在滞后反应、承载力下降和位移延展性等方面的抗震能力。

上述研究对构架结构节点半刚性研究十分有限, 为此, 本文基于 ABAQUS 软件建立了构架结构关键节点的力学模型和有限元模型并对其进行验证, 推导关键节点弹性刚度方程, 同时开展非线性分析获得关键节点的弯矩转角曲线和应力应变云图, 提出两种工况下结构的优化增强措施, 最后将其应用于构架整体结构的静力分析

研究节点的半刚性效应。

1. 有限元模型及验证

为了明确构架关键节点的传力途径和受力状态, 需建立结构的力学模型, 图 1 (a) 为关键节点的力学模型。本文采用 ABAQUS 软件建立构架关键节点的有限元模型, 如图 1 (b) 所示。其中, 构件采用 Q235B 钢材, 弹性模量为 2.06×10^5 MPa, 泊松比为 $\nu=0.30$, 密度为 7850 kg/m^3 , 屈服强度为 235MPa, 单元类型为 BEAM188, 角钢尺寸为 $L160 \times 160 \times 10 \text{ mm}$, 节点板厚度为 10 mm, 螺栓为 8.8 级高强螺栓, 间距 100 mm。对于建立的有限元模型是否可靠且符合实际情况, 本文对建立的有限元模型进行验证, 模型验证结果如图 2 所示, 可以发现, 数值仿真从受力变形特点上符合要求, 验证了建模方法的正确性和可靠性。

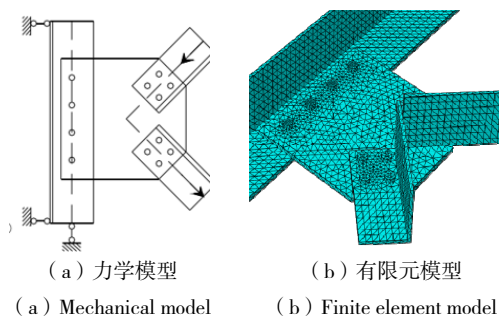


图 1 构架关键节点模型

Fig. 1 Model of the key nodes of the framework

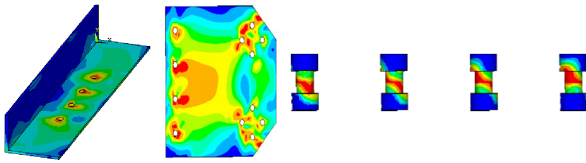


图2 模型验证

Fig. 2 Model validation

2. 半刚性节点理论

格构式构架结构刚度方程是进行结构二阶分析的基本刚度方程,因此获得半刚性连接形式下的关键节点的弹性刚度方程也是十分必要的。通过推导,关键节点的单元刚度方程的如式(1)所示,单元弹性刚度矩阵如式(2)所示。

$$[K_g]\{\delta_g\} = \{f_g\} \quad (1)$$

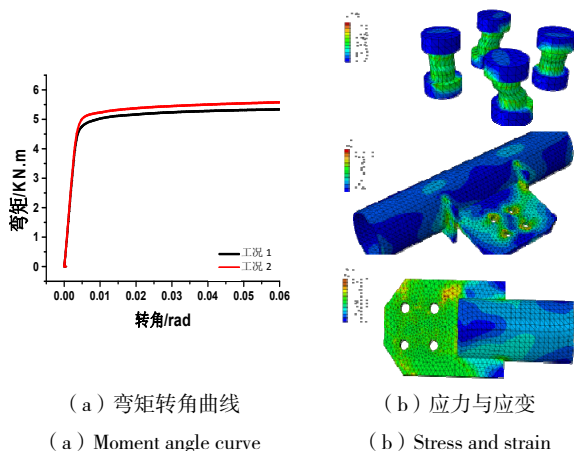
$$[K_g] = \frac{EI}{l} \begin{bmatrix} \frac{12}{l^2}\varphi_1 & \frac{6}{l}\varphi_2 & -\frac{12}{l^2}\varphi_6 \\ \frac{6}{l}\varphi_2 & \frac{12}{l^2}\varphi_3 & 2\varphi_4 \\ -\frac{12}{l^2}\varphi_6 & 2\varphi_4 & \frac{12}{l^2}\varphi_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $[K_g]$ 为单元弹性刚度矩阵; $\{\delta_g\}$ 为剪切变形; $\{f_g\}$ 为施加的荷载; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6$ 分别为节点微元不同方向上的变形;E为弹性模量;I为截面惯性矩。

3. 结果分析与结构优化

为了对关键节点进行优化设计,改善结构受力状态。首先要获取节点结构原设计的应力状态。如图3所示,通过有限元分析获得了两种工况下构架关键节点的弯矩-转角曲线和应力应变结果,比较两各工况下的弯矩-转角曲线发现,工况1节点以螺栓剪坏为主,工况2节点以插板弯曲破坏。螺栓个数、插板型式对节点的初始转动刚度有较大影响,主管、支管和节点板的截面尺寸对节点的转动刚度影响较小。节点板厚度和主管、支管的截面尺寸对节点的极限弯矩影响很小。

针对上述分析,工况1关键节点通过增加螺栓个数可有效提高节点承载力,增大螺栓直径和间距也能有所改善。对于工况2节点,螺栓强度有所富余,材料性未能充分发挥,可通过改变节点板、插板厚度和钢管截面尺寸提高关键节点承载力。最后,对上述优化措施进行有限元分析和验算,结果表明,能有效改善并原结果的受力性能。



(a) 弯矩转角曲线

(a) Moment angle curve

(b) 应力与应变

(b) Stress and strain

图3 计算结果

Fig. 3 Finite element calculation results

4. 关键节点半刚性效应分析

本文将优化前后2种工况的关键节点加入构架整体中进行计算。对比两种分析模型的最大应力和极限承载力,如表1所示,分析发现,优化前工况1比工况2结构最大应力和极限荷载分别大21.9%和5.2%,优化后分别大22.7%和6.0%,说明工况2为结构较为不利的工况。优化后工况1和工况2关键节点结构最大应力比优化前分别增加了28.1%和27.2%,极限荷载分别增加了15.4%和14.5%。表明相应的优化措施充分发挥了材料性能,有效提高了结构承载力。

表1 优化前后节点承载能力

Tab.1 Node carrying capacity before and after optimization

设计	工况	结构最大应力	极限荷载
优化前	工况1	53.43 MPa	343.7kN
	工况2	43.82 MPa	326.8kN
优化后	工况1	68.44 MPa	396.6kN
	工况2	55.76 MPa	374.3kN

5 结论

本文基于ABAQUS软件针对圆钢构架关键节点半刚性性能进行研究,计算了节点弯矩-转角曲线、结构应力与应变,并提出了节点优化措施。最后,对优化前后关键节点半刚性效应进行分析,获得以下主要结论:

- (1) 螺栓个数、插板型式对节点的初始转动刚度有较大影响;节点板厚度和主管、支管的截面尺寸对节点的极限弯矩影响很小。
- (2) 两种工况分别采用增加螺栓个数和改变节点板、插板厚度和钢管截面尺寸等有效措施提高关键节点承载力。
- (3) 优化前工况1比工况2关键节点最大应力和极限荷载分别大21.9%和5.2%,优化后分别大22.7%和6.0%。
- (4) 优化后工况1和工况2关键节点结构最大应力比优化前分别增加了28.1%和27.2%,极限荷载分别增加了15.4%和14.5%。

参考文献:

- [1]翟彬,王慧慧,商文念.特高压变电站构架节点半刚性影响研究[J].黑龙江大学学报,2020,11(01):21-27.
- [2]宋小卫,张广平,李小利等.750kV变电构架钢管混凝土法兰节点拉弯性能研究[J].建筑结构,2019,49(10):58-63.
- [3]钱程,沈国辉,郭勇等.节点半刚性对输电塔风致响应的影响[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(06):1082-1089.
- [4]焦安亮,李正良,刘红军等.特高压输电塔半刚性连接K形节点受力性能研究[J].建筑结构学报,2014,35(07):53-60.
- [5]马康,李维滨,严林飞.半刚性节点无支撑钢框架地震易损性分析研究[J].工业建筑,2016,46(09):158-162.
- [6]Deming Liu, Zhan Wang, Jianrong Pan, et al., Optimum design of nonlinear semi-rigid steel frame based on performance-price ratio via genetic algorithm[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 61: 105287.
- [7]Chao Zhang, Jie wu, Weiyan Huang, et al., Experimental and numerical study on seismic performance of semi-rigid steel frame infilled with prefabricated damping wall panels[J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113056.