

考虑初始缺陷的桥梁高大施工支架 整体稳定性能研究

唐永¹, 么学春¹, 赖旺盛², 罗凯³, 韩雪⁴, 李海锋^{3*}

(1. 中交建筑集团东南建设有限公司, 福建 厦门 361100; 2. 漳州城投设计咨询集团有限公司, 福建 漳州 363007;
3. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 4. 厦门工学院建筑科学与土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 高大施工支架是大跨度复杂桥梁工程中常用的钢结构支撑系统。实际工程中由于受到高大施工支架加工安装误差、超限受力或不均匀受力等因素影响, 因此钢结构施工支架存在节点连接不牢固、杆件弯曲变形等初始缺陷。为明确初始缺陷对桥梁高大施工支架整体稳定性能的影响规律, 首先开展了桥梁高大施工支架的线性屈曲分析, 进而探讨了节点半刚性、杆件初弯曲等初始缺陷对桥梁高大施工支架极限承载力的影响规律。为提高桥梁高大施工支架极限承载力的求解精度, 引入刚度系数来衡量节点半刚性, 综合考虑节点体对杆件计算长度的影响, 并提出模拟节点三向六自由度的方法以简化计算。研究表明, 结构的极限承载力与刚度系数相关, 实际工程中应保障刚度系数在4以上。以第一阶整体屈曲模态作为结构初始几何缺陷时, 缺陷对于结构的极限承载力和跨中平面外位移的影响更显著; 以第二阶屈曲模态作为结构初始几何缺陷时, 缺陷对于结构的边杆平面外位移的影响更显著。

关键词: 钢结构; 高大施工支架; 半刚性节点; 初弯曲; 整体稳定性

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0093-13

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230820001

Study on the Overall Stability Performance of Tall Construction Supports for Bridges Considering Initial Defects

TANG Yong¹, YAO Xuechun¹, LAI Wangsheng², LUO Kai³, HAN Xue⁴, LI Haifeng^{3*}

(1. CCC Fourth Highway Southeast Engineering Co., Ltd., Xiamen 361100, China; 2. Zhangzhou City Investment Design Consulting Group Co., Ltd., Zhangzhou 363007, China; 3. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 4. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen 361021, China)

*Corresponding author: lihai_feng@126.com

Abstract: Tall construction supports are commonly used as steel structure support systems in long-span complex bridge projects. Due to the machining and installation errors of tall construction supports, and excessive force or uneven force, the initial defects of steel structure construction supports, such as weak joint connection and bending deformation of rods, are caused. In order to clarify the effect of initial defects on the overall stability of the tall

收稿日期: 2023-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(51778248), 厦门市建设局建设科技项目(XJK2022-1-19)

作者简介:

唐永(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事道路桥梁施工方面的工作。E-mail: 23326539@qq.com。

么学春(1988—), 男, 学士, 工程师, 主要从事道路桥梁施工方面的工作。

通信作者:

李海锋(1983—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构稳定与抗震理论、新型钢桥墩抗震性能方面的研究。

E-mail: lihai_feng@126.com。

construction support of bridges, the linear buckling analysis of the tall construction support of bridges was carried out first. The influence of initial defects such as joint semi-rigidity and initial bending of rods on the ultimate bearing capacity of tall construction supports was discussed. In order to improve the solving accuracy of ultimate bearing capacity of tall construction supports of bridges, stiffness coefficient was introduced to measure the semi-rigidity value of joints, and the influence of joints on the calculated length of rods was considered comprehensively. In order to simplify the calculation, a 3-direction 6-DOF simulation method was proposed. The research shows that the ultimate bearing capacity of the structure is related to the stiffness coefficient, and the stiffness coefficient should be ensured above 4 in practical engineering. When the first-order global buckling mode is taken as the initial geometrical defect, the influence of the defect on the ultimate bearing capacity and the out-of-plane displacement at the mid-span of the structure is more sensitive. When the second-order buckling mode is used as the initial geometrical defect, the influence of the defect on the out-of-plane displacement of the side bar is more sensitive.

Keywords: steel structure; tall construction support; semi-rigid joint; initial bending; overall stability

随着我国科技的飞速发展,实际工程中应用了越来越多先进的施工技术,桥梁建设的水平有了明显提升,其中特大跨径桥梁、巨型梁结构以及异形梁结构等屡见不鲜。高大施工支架被广泛应用于大跨度以及各种复杂的桥梁结构中。目前针对大型桥梁高大施工支架的系统性分析较少,给人们的生命财产安全和工程业的健康发展带来了安全隐患,且高大施工支架坍塌事故的代价也是巨大的。节点半刚性和初始几何缺陷是影响高大施工支架稳定性的重要因素^[1-2]。节点半刚性指连接支架各个部分的节点在受力时的刚度特性^[3],而初始几何缺陷则涉及支架在初始状态时存在的尺寸和形状偏差^[4]。准确评估和修正节点半刚性与初始几何缺陷对于确保高大施工支架的稳定性和安全性至关重要。

王燕等^[5]指出梁柱节点连接主要是在刚接和铰接两种状态之间进行。邹阿鸣等^[6]对碗扣式脚手架进行了有限元分析,发现支架承载力随碗扣节点初始刚度的增大而增大,并呈现三段式变化。胡长明等^[7]对插口式钢管支撑架竖向极限承载特性和不同荷载传递路径下的节点受力区域关系进行了数值分析,得到了节点楔紧度与极限承载力的关系。MOHAMMED等^[8]对由刚性改为半刚性的梁柱节点框架进行了研究,发现屈曲荷载减小了8.95%,节点的半刚性直接影响支架的整体刚度和承载能力。

杨雪姣等^[9]利用三维激光扫描技术,对施工支架搭设过程中存在的加工误差进行了测量和分析,发现加工误差会导致结构整体变形,增加整体应力并降低结构强度。袁雪霞等^[10]建立了扣件式钢管支模架稳定承载能力分析的三维有限元模型,结果表明线性屈曲所得到的稳定承载力要大于非线性稳定计算结果,尤其是在存在初始缺陷时由线性屈曲所得的稳定承载力是不尽合理的。GAO等^[11]采用随机有限元理论研究了不同缺陷结构的不同影响,结果表明缺陷给钢脚手架带来了严重的安全隐患。

综上所述,节点半刚性和初始几何缺陷是影响高大施工支架稳定性的两个重要因素。准确评估和修正这些因素对于确保支架的稳定性和安全性至关重要。国内学者对支撑体系稳定性的研究多集中于扣件式、盘扣式、承插式支撑体系,对于新型高大支撑体系稳定性的研究较少^[12]。因此,本文以一巨型钢箱梁的高大施工支架为背景,通过ABAQUS软件建立该高大施工支架的有限元模型,并分析节点半刚性和杆件初弯曲对高大施工支架稳定性的影响规律,为高大施工支架设计和施工提供参考。

1 工程概况

为研究新型高大支撑体系,本文以某市中环路快速化改造工程项目为背景,研究该项目第三标段第九联A段与B段连接部分。该连接部分上部承受的钢箱梁为一巨型钢箱梁,支撑体系承受的荷载极大。钢箱梁为一渐变段,其主梁采用单箱十二室,梁高为2.10 m,顶板最宽处为42.90 m,底板最宽处为38.40 m,悬臂长度为3.65 m,悬臂根部高0.70 m,端部高0.28 m。为支撑该巨型钢箱梁,采用了总跨径为42 m,搭设高度为10 m的15跨双排高大施工支架。该支架搭设高度较高且总跨径较长,故杆件初弯曲较为明显。支架与钢箱梁之间布置的支座以及钢箱梁与高大施工支架的相对位置示意如图1所示,施工布置如图2所示。高大施工支架的安装先在现场预拼钢管柱,然后进行平联安装,平联安装完后安装斜撑以增强其稳定性。支架各部件之间采用栓焊连接,栓焊连接的节点刚度较为复杂,在文献[13]中并未给出。支架布置如图3~5所示,支架三维示意如图6所示,支架杆件具体参数如表1所示。

2 有限元模型

高大施工支架中各立杆、水平杆、横向支撑、斜撑均采用Q235型结构钢,弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为0.3,本构模型采用双折线模型,取屈服强度 $f_y =$

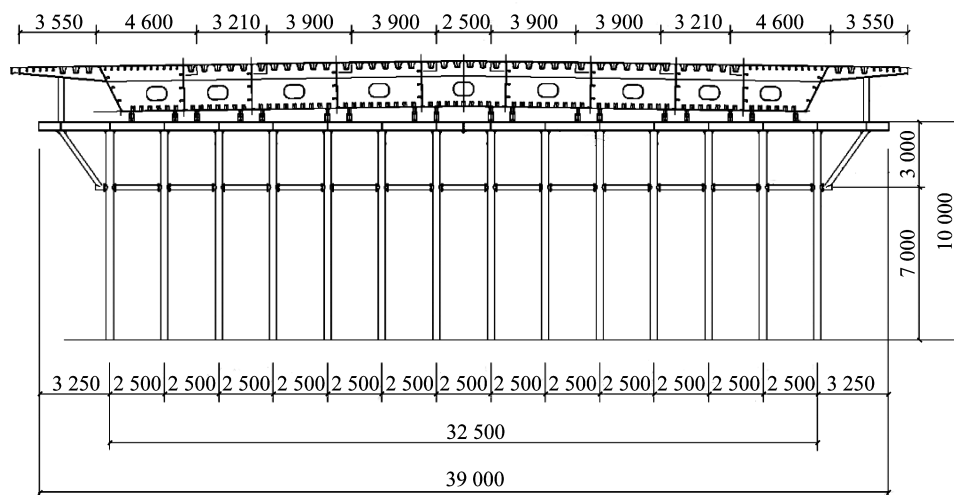
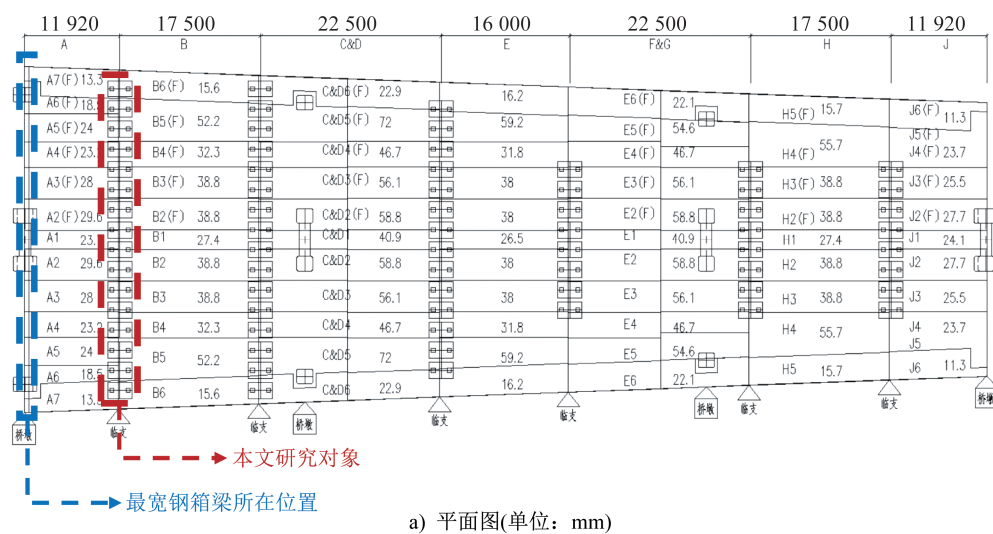
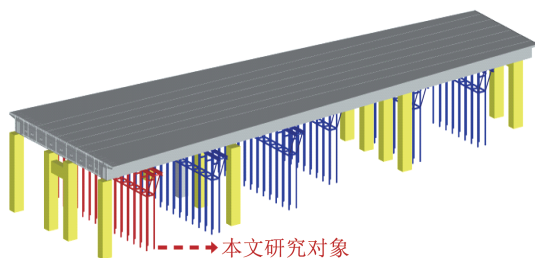


图 1 中支点支架立面布置(单位: mm)

Fig. 1 Middle support elevation layout (unit: mm)



a) 平面图(单位: mm)



b) 三维示意图



c) 现场示意图

图 2 施工布置

Fig. 2 Construction layout

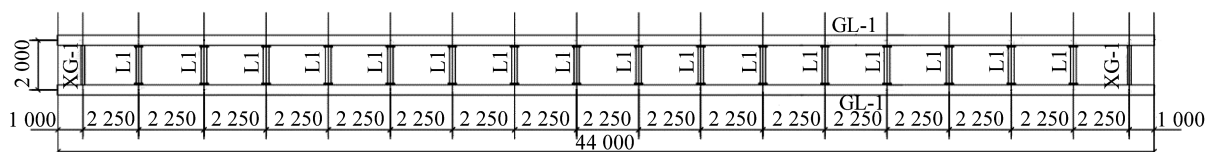


图 3 支架平面布置(单位: mm)

Fig. 3 Support plan layout (unit: mm)

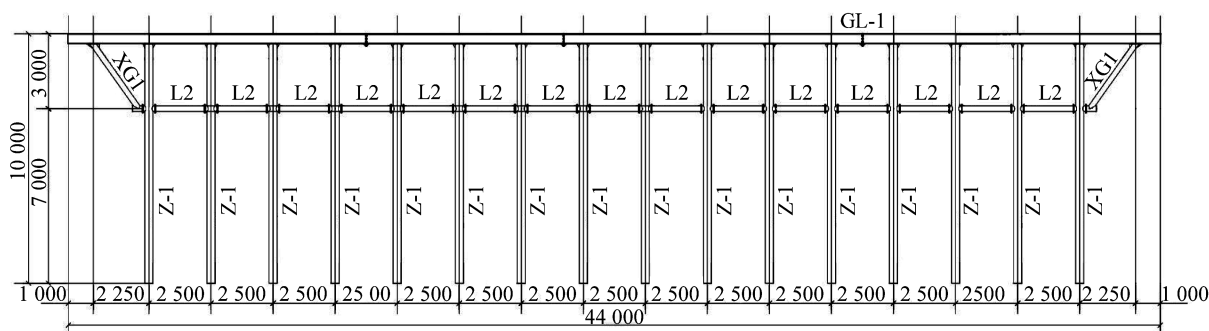


图4 支架立面布置(单位:mm)

Fig. 4 Support elevation layout (unit:mm)

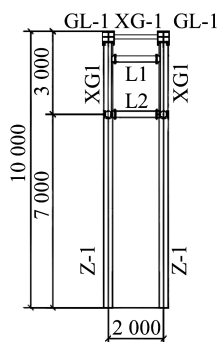


图5 支架侧立面布置(单位:mm)

Fig. 5 Support side elevation layout (unit:mm)

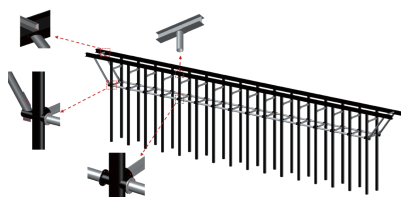


图6 支架整体、局部三维示意

Fig. 6 Support overall and local three-dimensional diagram

235 MPa, 极限抗拉强度 $f_{s,u}=341$ MPa, 此时塑性应变 $\epsilon_{s,u}=0.01$ 。整体模型采用 B31 梁单元来模拟, 整体共划分为 1 168 个单元, 3 438 个节点。支架底部设置混凝土配筋条形独立基础, 因此支架底部采用固定端约束。在

ABAQUS 软件中施加荷载及设置边界约束条件, 模型如图 7 所示。

高大施工支架主要承受钢箱梁自重、高大施工支架自重、施工荷载以及风荷载, 依据文献[13], 荷载效应组合如式(1)所示, 荷载取值如表 2 所示。

$$N = \gamma_G N_{GK} + \psi_Q \gamma_Q (N_{QK} + N_{WK}) \quad (1)$$

式中: γ_G 为永久荷载分项系数, 在稳定性验算下高大施工支架受永久荷载控制, 取为 1.35^[13]; ψ_Q 为可变荷载组合值系数, 取为 0.9^[13]; γ_Q 为可变荷载分项系数, 在稳定性验算下高大施工支架受永久荷载控制, 取为 1.4^[13]; N_{GK} 为永久荷载, 包括钢箱梁自重以及高大施工支架自重, 为实测值; N_{QK} 为施工荷载, 取为 2 kN·m⁻²^[13]; N_{WK} 为风荷载, 取为 0.7 kN·m⁻²^[14]。

在稳定性分析中, 首先进行高大施工支架的线性特征值屈曲分析, 得到各阶屈曲模式及其特征值; 然后引入节点半刚性和杆件初弯曲, 对高大施工支架进行大位移几何非线性弹塑性稳定分析以获取高大施工支架的极限承载力, 并研究节点半刚性值和缺陷模式对极限承载力的影响。

3 特征值屈曲分析

特征值屈曲分析是先通过线性静力分析得到结构刚度矩阵, 再通过屈曲特征值与屈曲模式分析得到各阶屈曲模式及其特征值。由线性屈曲模式分析可知, 高大施

表 1 支架杆件

Table 1 Support members

序号	名称	规格号	数量/件	长度/m	材质	规格/mm	属性
1	钢管	Z-1	32	10.00	Q235B	Φ325×8	立杆
2	钢管	L1	32	2.00	Q235B	Φ219×6	横向支撑
3	钢管	L2	30	2.50	Q235B	Φ219×6	横向支撑
4	钢管	XG1	4	3.75	Q235B	Φ219×6	斜撑
5	型钢	GL-1	4	11.00	Q235B	HW400×400×13×21	水平杆
6	型钢	XG-1	2	2.00	Q235B	HW300×300×7×10	横向支撑

表2 荷载明细
Table 2 Load list

荷载编号	荷载/kN	荷载编号	荷载/kN	荷载编号	荷载/kN	荷载编号	荷载/kN
F_1	109.2	F_2	160.3	F_3	182.7	F_4	252.0
F_5	182.7	F_5	252.0	F_7	112.8	F_8	163.2
F_9	112.8	F_{10}	163.2	F_{11}	135.7	F_{12}	196.4
F_{13}	135.7	F_{14}	196.4	F_{15}	135.7	F_{16}	205.9
F_{17}	135.7	F_{18}	205.9	F_{19}	96.0	F_{20}	143.4
F_{21}	96.0	F_{22}	143.4	F_{23}	135.7	F_{24}	205.9
F_{25}	135.7	F_{26}	205.9	F_{27}	135.7	F_{28}	196.4
F_{29}	135.7	F_{30}	196.4	F_{31}	112.8	F_{32}	163.2
F_{33}	112.8	F_{34}	163.2	F_{35}	182.7	F_{36}	252.0
F_{37}	182.7	F_{38}	252.0	F_{39}	109.2	F_{40}	160.3

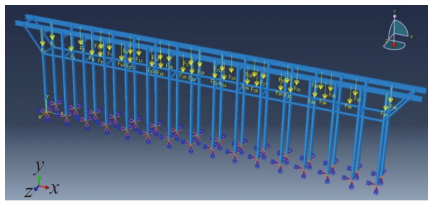


图7 支架三维有限元模型

Fig. 7 Three-dimensional finite element model of support

工支架在荷载作用下的整体屈曲模态,其最大挠度主要集中在结构跨中和两端,如图8所示。

第一阶整体屈曲模态为结构跨中附近横向弯曲失稳,为单波形对称屈曲模态。此模态中结构屈曲形状关于结构yz轴所在平面对称,结构跨中产生横向位移,没有转角。由于立杆上方刚度较大,因此各立杆中点附近存在拐点且拐点相对位置相同。

第二阶整体屈曲模态为扭转失稳,为单波形反对称屈曲模态,最大位移出现在结构两端,各立杆屈曲形态的拐点相对位置不同。

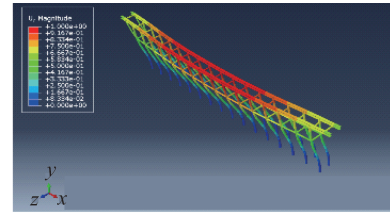
第三阶整体屈曲模态与第二阶整体屈曲模态类似,为单波形反对称屈曲模态,最大位移出现在结构两端,各立杆屈曲形态的拐点相对位置不同。

高大施工支架在前三阶屈曲模态下的特征值屈曲临界荷载系数 λ 如表3所示,第一阶屈曲临界荷载系数大于10,可见结构具有较好的稳定性能。

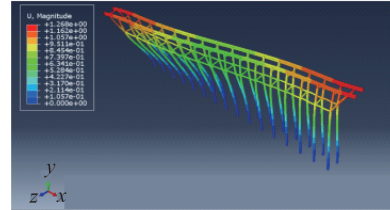
4 节点半刚性

4.1 刚度系数

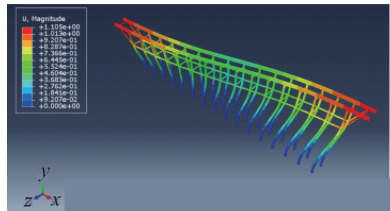
高大施工支架的各杆件相交节点构造形式如图9所示,采用栓焊连接,螺栓采用10.9级大六角高强螺栓,属



a) 一阶屈曲模态



b) 二阶屈曲模态



c) 三阶屈曲模态

图8 支架屈曲模态

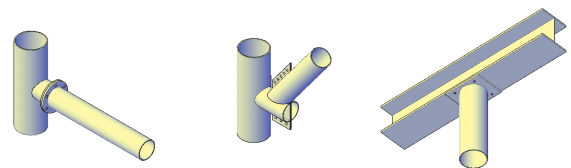
Fig. 8 Buckling mode of support

表3 各阶屈曲模态特征值

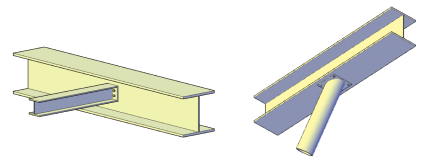
Table 3 Characteristic values of buckling modes under different orders

阶数	λ
第1阶	13.7
第2阶	16.4
第3阶	16.9

于半刚性节点^[15]。



a) 节点Z-1与L1(L2) b) 节点Z-1与XG1 c) 节点Z-1与XG-1



d) 节点GL-1与XG-1 e) 节点GL-1与XG1

图9 各杆件相交节点三维图

Fig. 9 Three-dimensional diagram of joints of all members

本文为半刚性节点的模拟思路为:在节点位置设置重合节点,采用弹簧约束,在2个节点之间共设置6根弹

簧,如图10所示,分别用来模拟节点的三向六自由度,包括1个轴向刚度 K_{ax} 、2个剪切刚度 K_{sy} 、 K_{sz} 、2个弯曲刚度 K_{my} 、 K_{mz} 和1个扭转刚度 K_t 。该方法的关键是节点刚度的确定。

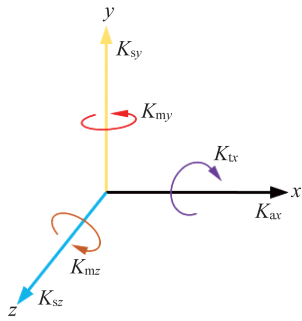


图10 节点刚度示意

Fig. 10 Joint stiffness diagram

目前描述节点半刚性刚度常用的方法是采用简单

的函数表达式来拟合试验所得的节点弯矩 M -转角 θ 曲线,其中较适合于结构分析的有三参数模型^[16],其形式为:

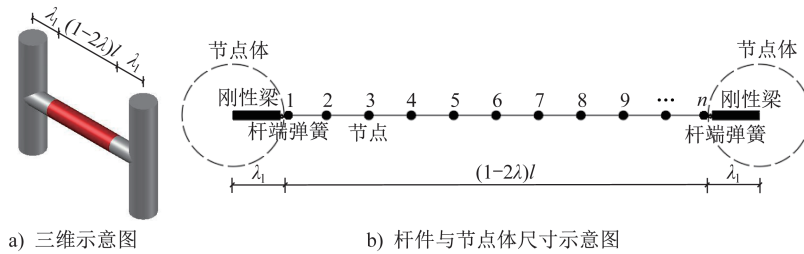
$$M = \frac{R_{ki}\theta}{[1 + (\theta/\theta_0)^n]^{\frac{1}{n}}} \quad (2)$$

式中: R_{ki} 为节点的初始刚度,与连接的类型和几何尺寸有关; n 为性质系数; θ_0 为参考塑性转角, $\theta_0 = M_u/R_{ki}$,其中 M_u 为极限抗弯承载力。

文献[13]要求应采用实验定义该类支撑结构的节点刚度,为提高计算效率本文将节点刚度乘上刚度系数来衡量节点的半刚性值。节点轴向刚度和节点剪切刚度为理论值,节点弯曲刚度和节点扭转刚度为有限元计算值。此外,考虑了杆件的计算长度^[17]如下:

$$l_e = (1 - 2\lambda)l \quad (3)$$

式中: l 为杆件的实际长度; λ 为一个节点体的大小,如图11所示。



a) 三维示意图

b) 杆件与节点体尺寸示意图

图11 杆件与节点体示意

Fig. 11 Schematic diagram of member and joint

轴向刚度 K_a 的表达式为:

$$K_a = \alpha_a \frac{\min \{E_c A_c, E_b A_b\}}{l_e} \quad (4)$$

式中: E_c 为悬臂梁段材料的弹性模量; A_c 为悬臂梁段横截面的面积; E_b 为高强螺栓的弹性模量; A_b 为高强螺栓的横截面面积总和; α_a 为轴向刚度系数。

剪切刚度 K_{sy} 的表达式为:

$$K_{sy} = K_{sz} = \alpha_s \frac{\min \{G_c A_c, G_b A_b\}}{l_e} \quad (5)$$

式中: G_c 为杆件材料的剪切模量; A_c 为杆件横截面的面积; G_b 为高强螺栓的弹性模量; A_b 为高强螺栓的横截面面积总和; α_s 为剪切刚度系数。

弯曲刚度的表达式为:

$$K_{my} = \alpha_{my} k_{my} \quad (6)$$

$$K_{mz} = \alpha_{mz} k_{mz} \quad (7)$$

式中: k_{my} 为有限元计算的节点 y 向弯曲刚度; k_{mz} 为有限元计算的节点 z 向弯曲刚度; α_m 为弯曲刚度系数。

扭转刚度的表达式为:

$$K_t = \alpha_t k_t \quad (8)$$

式中: k_t 为有限元计算的节点扭转刚度; α_t 为抗扭刚度系数。

4.2 节点有限元模型

为确定各节点的初始弯曲刚度和初始扭转刚度,采用ABAQUS软件建立有限元模型,单元类型采用C3D8R单元,其本构模型与第2节中的本构模型相同。

采用ABAQUS软件中的与“Connectors”有关的“Translator”功能来模拟高强螺栓,通过设置 $288\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ ^[18]的轴向刚度约束其他5个方向的自由度,同时施加螺栓预紧力 166 kN ^[18]。当模型发生变形时,接触的切向和法向行为分别定义为无摩擦和硬接触。在各杆杆端截面形心处设置参考点,并将参考点与截面采用“Kinematic Coupling”的方式耦合。边界条件设置在刚度较大的杆件两端,以下简称主杆,荷载点设置在刚度较小的杆件端部,以下简称支杆。当对 x 、 z 方向施加力偶时,边界条件设置为完全铰接;当对 y 方向施加力偶时,增加对 y 向的转动约束,以节点Z-1与L1(L2)为例,如图12所示。最终提取各类节点各方向的弯矩-转角曲线,如图13所示。各模型编号包括了主杆规格号、支杆规格号、施加的力偶方向,如编号ZL-x的含义为该模型以Z-1为主杆、以L1(L2)为支杆、在支杆施加 x 向力偶。

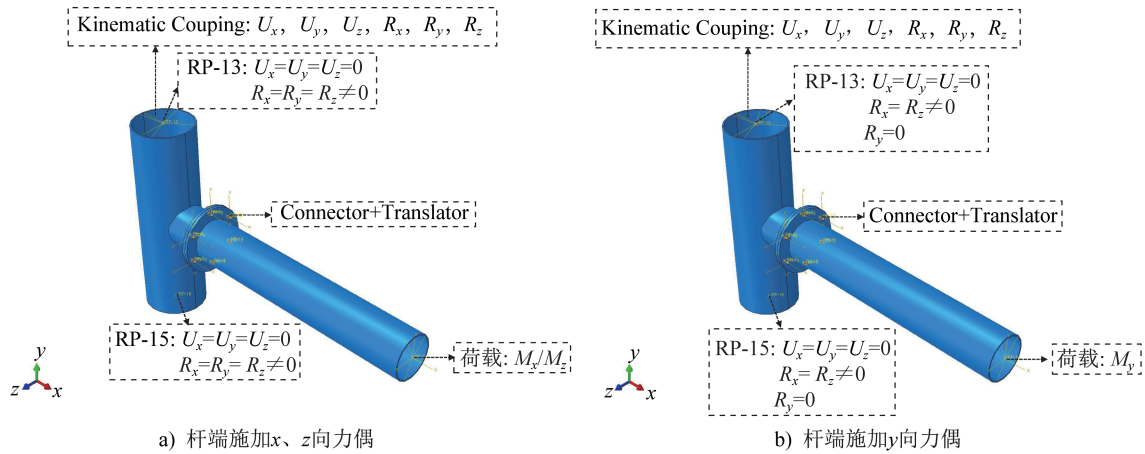


图12 节点Z-1与L1(L2)有限元模型

Fig. 12 Joint Z-1 and L1(L2) finite element model

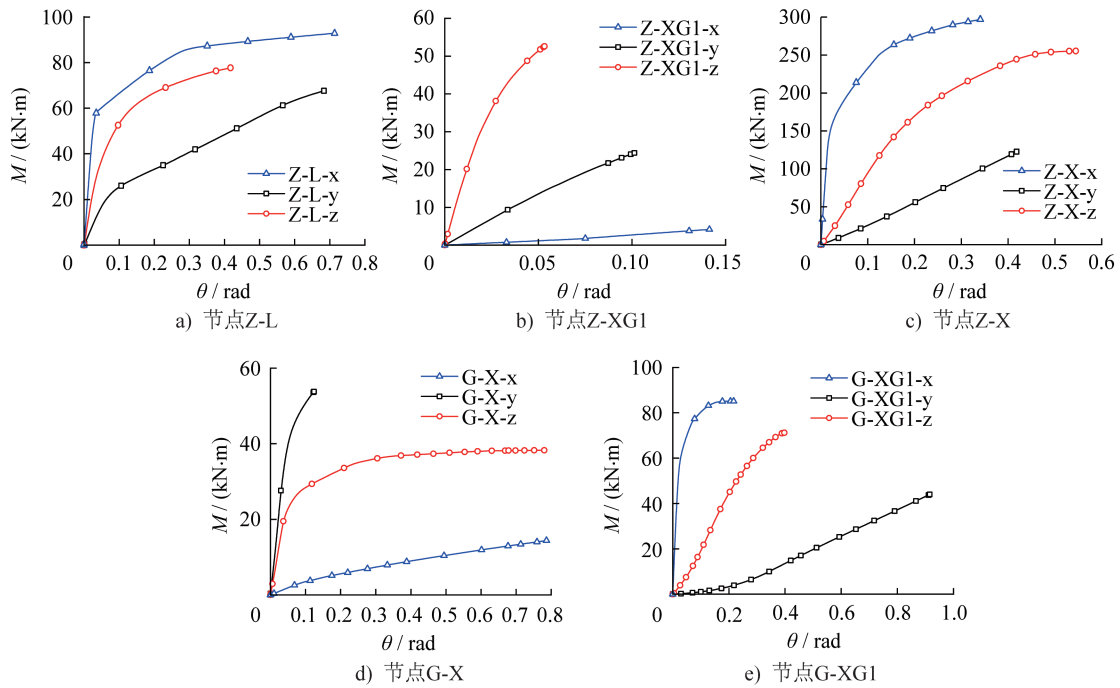


图13 各节点弯矩-转角曲线

Fig. 13 Bending moment-rotation curve of all joints

5 引入初始缺陷的有限元模型

5.1 有限元模型验证

为验证有限元仿真模型的正确性,将其与文献[19]的实测结果进行对比。以B31梁单元建立梁模板下立杆、水平杆、剪刀撑模型,每个节点采用SPRING2来模拟三向六自由度,各自由度大小按式(9)~(10)考虑。为考虑周边立杆对梁模板下立杆的支撑约束作用,在侧向设置弹簧支撑,弹簧刚度为 $52 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ [19]。支架上方的模板自重、混凝土自重、钢筋自重、振捣或倾倒混凝土荷载、施工人员及设备荷载、方木自重均以均布荷载的形式施加在支架顶部。文献[19]中某一项目的有限元模型如图14所示,文献[19]中3个项目的有限元计算结果与文献

计算结果、实测结果的对比如图15所示。有限元结果与试验结果基本吻合,因此本文所采用的建模方式是可靠的。

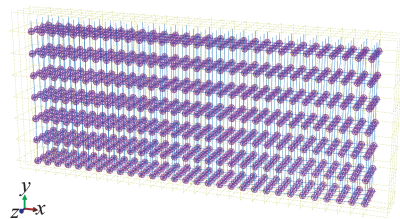


图14 家天下二期小学工程部分有限元模型

Fig. 14 Part of finite element model of Jiatianxia phase II primary school project

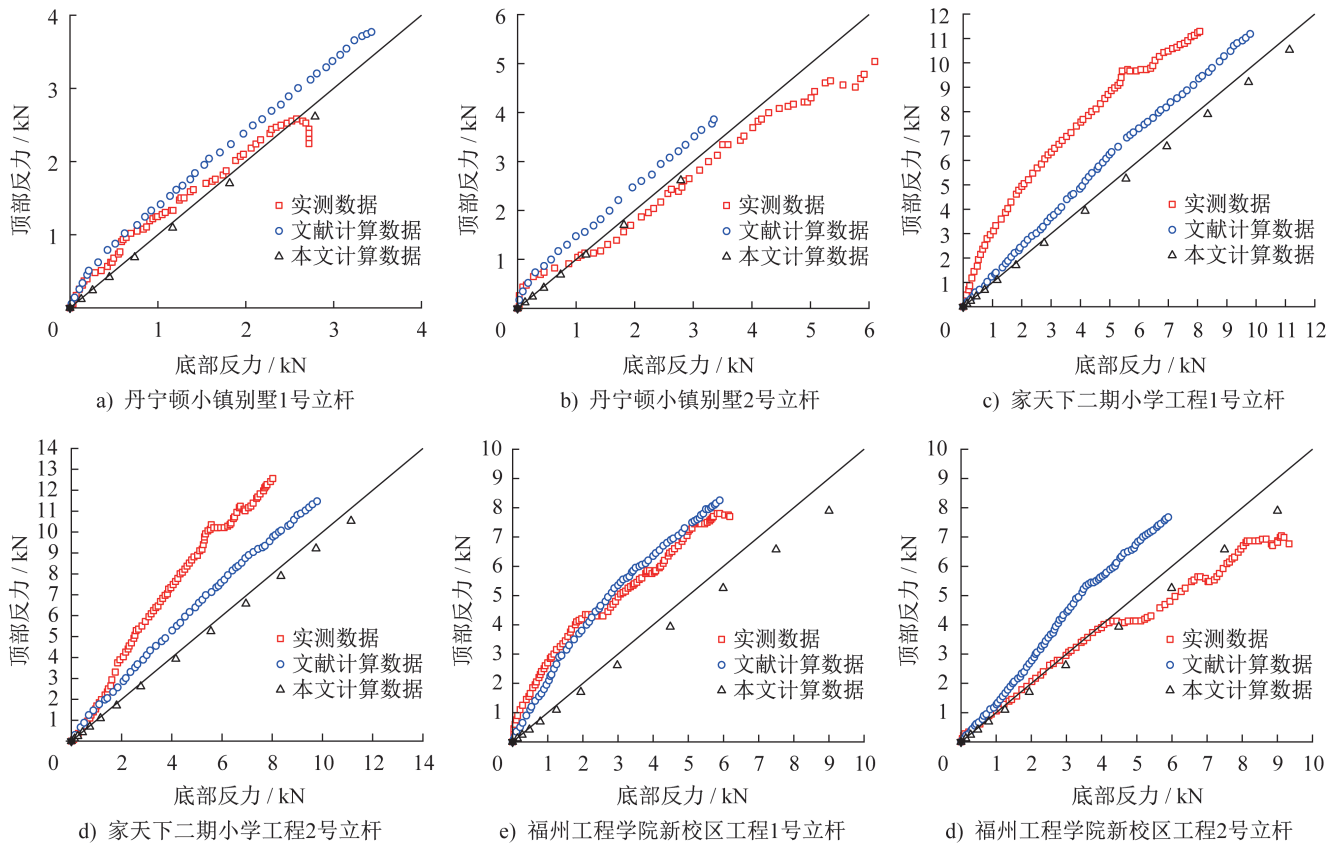


图15 立杆轴力对比

Fig. 15 Axial force comparison of vertical members

节点轴向刚度、剪切刚度采用式(9)计算^[19]:

$$P = (0.369 + 3.06 \ln(1 + \Delta_1)) \exp\left(\frac{T_r}{40}\right) \quad (9)$$

式中: Δ_1 为横杆位移, 单位为 mm; T_r 为扣件拧紧扭矩, 不大于 $50 \text{ N}\cdot\text{m}$; P 为竖向力, 单位为 kN。

节点弯曲刚度、扭转刚度采用式(10)计算^[19]:

$$T = (-500 \theta^2 + 11233 \theta + 39.3522) f(T_r) f(T) f(N) \quad (10)$$

其中 $f(T_r) = 1 + 0.409 \ln\left(\frac{T_r}{40}\right)$; $f(T) = \left(\frac{\Delta T}{600}\right)^{-0.25}$;

$f(N) = -0.0027N^2 + 0.073N + 0.7$ 。

式中: T 为扭矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; θ 为转角, 单位为 rad; ΔT 为历史加载幅度, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$, $\Delta T \leq 600 \text{ N}\cdot\text{m}$; T_r 为扣件拧紧扭矩, 单位为 $\text{N}\cdot\text{m}$; N 为已周转次数, 若 $N \geq 25$, 取 $N = 25$ 。计算中, ΔT 取 $450 \text{ N}\cdot\text{m}$, N 取 10。

5.2 有限元模型

为了研究节点半刚性值对高大施工支架极限承载力的影响, 将第4节中有限元计算的节点弯曲刚度、扭转刚度、理论节点轴向刚度和剪切刚度引入支架的各个节点中, 并将 α 分别取为 0.1、1.0、2.0、3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、100.0。节点体的大小 λl 取为杆件的长度

的 5%, 即 $\lambda = 0.05$ 。在 ABAQUS 软件建模过程中, 在高大施工支架杆件的共节点上添加非线性弹簧单元 SPRING2 来模拟节点的刚度。

为了研究杆件初弯曲对高大施工支架极限承载力的影响, 本文采用前二阶屈曲模态模拟结构的初始几何缺陷, 分析过程考虑几何大变形的影响。在 ABAQUS 软件分析过程中, 可分为两步进行: 第 1 步先在完善的结构模型中对构件进行弹性特征值分析, 由此得到前三阶屈曲模态; 第 2 步弹塑性分析就可以利用第 1 步分析得到的初始缺陷形式, 将某一阶屈曲模态变形结果乘上缩放系数 δ 后导入新模型, 再采用弧长法进行非线性分析, 由此可得到荷载-位移曲线。我国规范规定框架及支撑结构整体初始几何缺陷代表值的最大值 Δ_0 可取为 $H/250$ ^[15], H 为结构总高度。本文将脚手架的前二阶屈曲模态作为缺陷模式, 令缺陷幅值分别为 $H/200$ 、 $H/250$ 、 $H/500$ 、 $H/1000$, 以研究各阶模态组合下初始几何缺陷对结构极限承载力的影响。

将上述初始缺陷引入高大施工支架中, 各模型编号包括选取屈曲模态阶数、缺陷幅值、刚度系数, 如编号 A-H/1000-0.1 为选取第一阶屈曲模态为结构的初始几何缺陷、缺陷幅值为 $H/1000$ 、刚度系数 $\alpha = 0.1$ 。各模型计

算结果如表4~6所示,其中 P_u 为模型极限承载力, Δ_k 为模型达到极限承载力时对应的边杆平面外位移。各模型荷
模型达到极限承载力时对应的跨中平面外位移, Δ_b 为模 载-位移曲线如图16所示。

表4 不同缺陷下 P_u 对比

Table 4 Comparison of P_u under different defects

kN

模型编号	刚度系数 α											
	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
A-H/1000	16 232	21 274	26 406	30 372	34 038	35 408	37 294	37 846	37 869	38 398	38 460	38 799
A-H/500	14 168	19 035	23 637	27 664	31 135	32 169	33 895	34 496	34 557	35 256	35 313	35 376
A-H/250	13 205	17 722	22 092	25 885	29 198	30 511	32 311	32 882	32 895	33 303	33 501	33 827
A-H/200	12 313	16 661	20 780	24 407	27 570	28 851	30 564	31 214	31 289	31 942	32 155	33 158
B-H/1000	17 030	20 162	24 469	27 780	30 304	32 081	33 245	34 258	34 880	35 207	36 315	37 124
B-H/500	16 968	20 068	24 267	27 563	30 129	31 718	32 877	33 911	34 546	34 902	36 210	37 040
B-H/250	16 837	19 850	24 179	27 512	30 106	31 678	32 778	33 690	34 468	34 817	36 110	36 946
B-H/200	15 116	17 917	21 890	24 981	27 374	29 199	30 443	31 400	32 130	32 666	34 122	35 058

表5 不同缺陷下 Δ_k 对比

Table 5 Comparison of Δ_k under different defects

m

模型编号	刚度系数 α											
	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
A-H/1000	0.085 2	0.072 8	0.057 8	0.034 4	0.020 6	0.019 4	0.016 1	0.016 1	0.015 8	0.015 5	0.015 3	0.011 0
A-H/500	0.107 4	0.091 3	0.071 7	0.043 0	0.025 9	0.024 5	0.020 2	0.020 1	0.019 5	0.019 2	0.018 5	0.013 3
A-H/250	0.134 4	0.114 2	0.089 6	0.053 2	0.032 0	0.030 3	0.025 3	0.025 2	0.024 3	0.024 3	0.023 0	0.016 2
A-H/200	0.157 1	0.132 5	0.103 3	0.060 7	0.036 3	0.034 1	0.027 8	0.027 7	0.026 3	0.026 0	0.024 3	0.016 9
B-H/1000	0.174 6	0.119 1	0.100 2	0.094 5	0.059 3	0.058 3	0.057 4	0.050 0	0.047 0	0.046 5	0.045 0	0.029 6
B-H/500	0.177 2	0.121 2	0.101 9	0.096 8	0.060 9	0.059 8	0.059 0	0.051 2	0.048 1	0.047 2	0.045 6	0.029 9
B-H/250	0.182 1	0.124 2	0.104 4	0.098 5	0.061 7	0.060 5	0.059 5	0.051 7	0.048 6	0.047 6	0.045 9	0.030 0
B-H/200	0.184 5	0.125 7	0.105 3	0.099 2	0.062 1	0.060 8	0.059 8	0.051 9	0.048 8	0.047 7	0.045 9	0.030 0

表6 不同缺陷下 Δ_b 对比

Table 6 Comparison of Δ_b under different defects

m

模型编号	刚度系数 α											
	0.1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
A-H/1000	0.069 9	0.071 6	0.055 9	0.033 2	0.018 3	0.017 7	0.014 9	0.014 7	0.014 3	0.014 0	0.013 1	0.009 4
A-H/500	0.075 3	0.076 1	0.059 8	0.035 3	0.019 3	0.018 9	0.016 0	0.015 8	0.015 2	0.014 8	0.014 0	0.009 9
A-H/250	0.081 6	0.080 7	0.063 2	0.036 9	0.020 3	0.019 7	0.016 6	0.016 5	0.015 8	0.015 5	0.014 6	0.010 3
A-H/200	0.091 5	0.089 5	0.069 5	0.040 5	0.021 9	0.021 2	0.017 8	0.017 5	0.016 6	0.016 2	0.015 1	0.010 5
B-H/1000	0.083 8	0.068 3	0.058 7	0.056 5	0.037 6	0.035 8	0.034 7	0.033 3	0.029 5	0.029 2	0.028 2	0.020 5
B-H/500	0.091 1	0.074 2	0.063 5	0.060 7	0.040 3	0.038 6	0.037 1	0.035 4	0.031 2	0.030 9	0.030 0	0.021 7
B-H/250	0.108 5	0.088 3	0.075 6	0.072 3	0.048 0	0.046 0	0.044 2	0.042 1	0.037 2	0.036 8	0.035 7	0.025 8
B-H/200	0.126 2	0.101 1	0.086 2	0.082 5	0.054 5	0.051 7	0.049 6	0.047 0	0.041 4	0.040 6	0.039 2	0.027 7

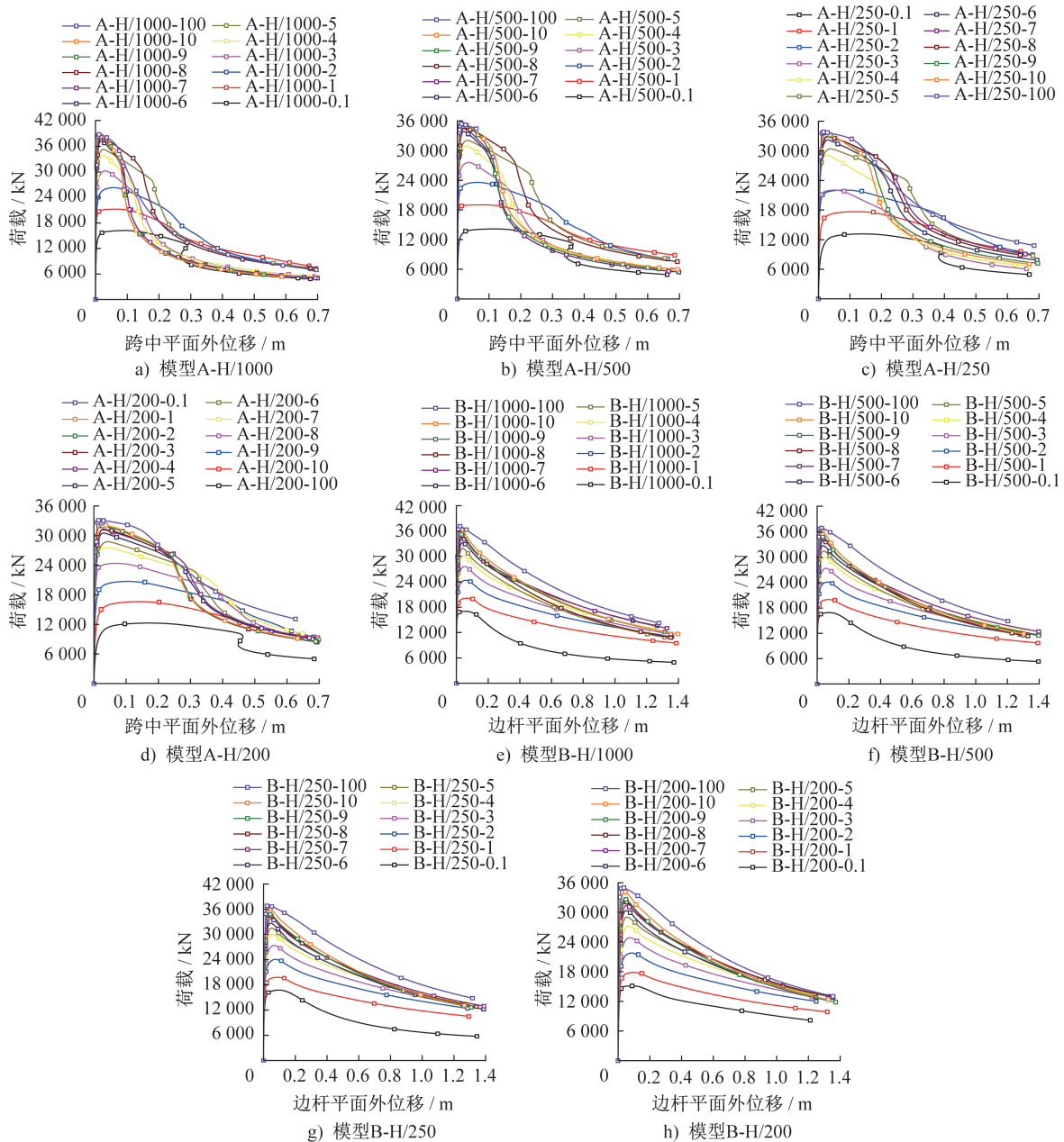


图 16 各模型荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curves of all models

5.3 结果分析

如图 17 所示,当 α 取值超过 6 时,节点刚度值对支架的极限承载力影响不大,基本接近刚接节点极限承载力的 90%;当 α 介于 4 到 6 之间时,随着 α 的减小,高大施工支架的极限承载力开始有明显降低;当 α 取值小于 4 时,极限承载力出现骤降。因此在实际结构中,应保证刚度系数在 4 以上,以保障高大施工支架的安全性。

各模型荷载及挠度的变化率曲线如图 18 所示。随着结构初始几何缺陷的增大,结构的极限承载力降低,挠度增加,但对于节点刚度较大的结构,极限承载力降低的幅度更小,挠度增幅也更小。当缺陷幅值从 $H/1\ 000$ 增大到 $H/200$ 时,模型 A-0.1 的跨中平面外位移增加了 84.4%,在

同一节点刚度下,初始几何缺陷对极限承载力的影响最大只有 2.4%,对挠度的影响较为明显。以第一阶屈曲模态作为结构初始几何缺陷,当缺陷幅值从 $H/1\ 000$ 增大到 $H/200$ 时,跨中平面外位移增加了 84.4%,边杆平面外位移增加了 5.7%,此时结构的跨中平面外位移对于初始几何缺陷更为敏感;以第二阶屈曲模态作为结构初始几何缺陷,当缺陷幅值从 $H/1\ 000$ 增大到 $H/200$ 时,跨中平面外位移增加了 31%,边杆平面外位移增加了 51%。此时结构的边杆平面外位移对于初始几何缺陷更为敏感。原因在于,结构的第一阶整体屈曲模态为结构跨中附近横向弯曲失稳,第二阶整体屈曲模态为结构两端的边杆出现横向弯曲失稳。

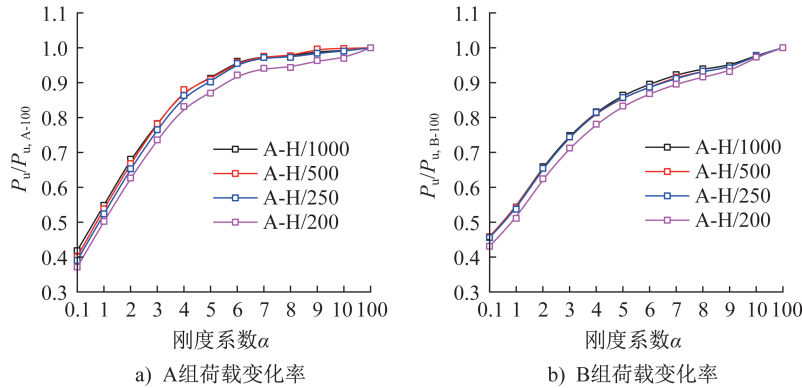


图17 各模型极限荷载随节点刚度的变化率

Fig. 17 Change rate of ultimate load of all models with joint stiffness

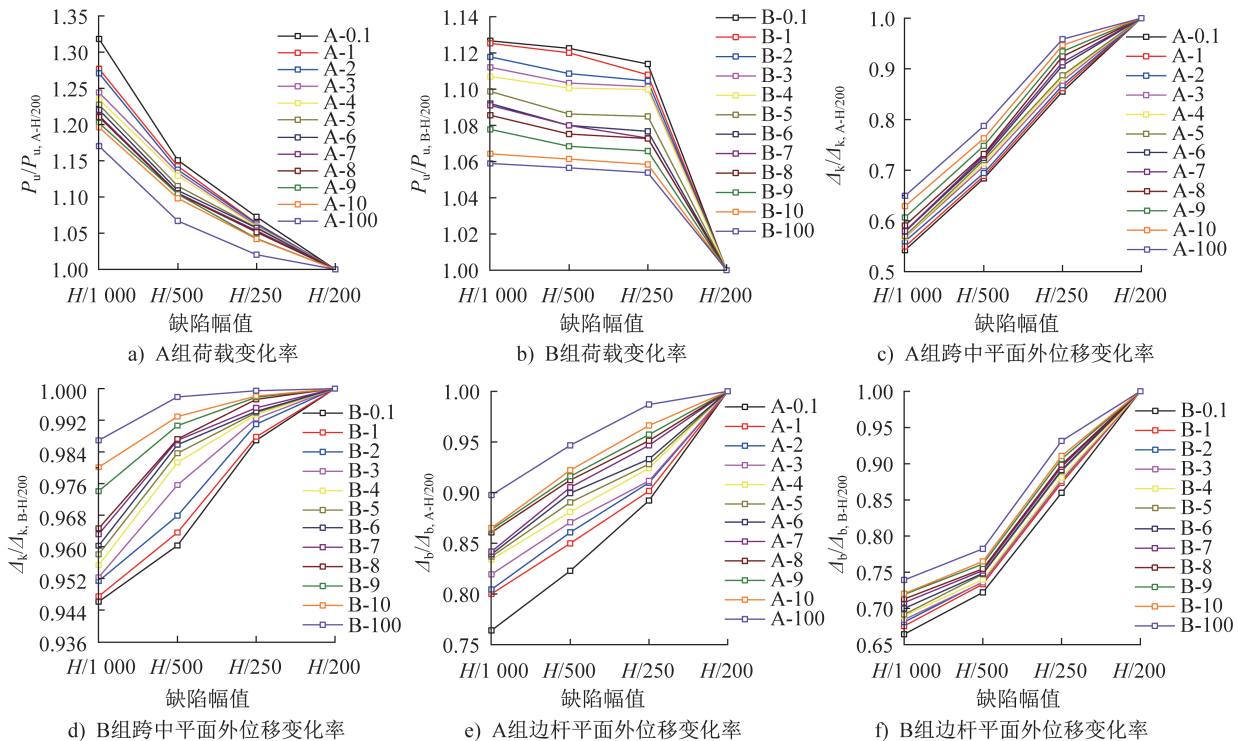


图18 各模型极限荷载及挠度随缺陷幅值的变化率

Fig. 18 Change rate of ultimate load and deflection of all models with defect amplitude

因此,在验算该类高大施工支架立杆的变形是否满足要求时,若验算对象为结构跨中附近的立杆,建议以第一阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷;若验算对象为结构边杆,建议以第二阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷。在求解该类高大施工支架立杆的极限承载力时,应以第一阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷。

5 结论

(1) 为提高桥梁高大施工支架极限承载力的求解精度,引入了刚度系数 α 来衡量节点半刚性值,综合考虑节点对杆件计算长度的影响,提出了模拟节点三向六自由度的方法以简化计算。

(2) 结构的极限承载力与刚度系数 α 相关:当 α 小于4时, α 的变化对高大施工支架的极限承载力影响巨大。因此,在现场拼装高大施工支架时应严格控制节点构造,避免高大施工支架因节点刚度较低而引起结构失稳。

(3) 选用不同的屈曲模态作为结构初始几何缺陷时,结构的极限承载力和挠度表现出不同的敏感度。以第一阶整体屈曲模态作为结构初始几何缺陷时,缺陷对结构的极限承载力和跨中平面外位移的影响更显著;以第二阶屈曲模态作为结构初始几何缺陷时,缺陷对结构边杆平面外位移的影响更显著。因此,在验算该类高大施工支架立杆的变形是否满足要求时,若验算对象为结构跨中附近的立杆,建议以第一阶整体屈曲模态作为初

始几何缺陷;若验算对象为结构边杆,建议以第二阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷。在求解该类高大施工支架立杆的极限承载力时,应以第一阶整体屈曲模态作为初始几何缺陷。

参考文献:

- [1] 欧加加,陈迪,龙卫国,等.K6型单层球面木网壳整体稳定性研究[J].建筑学报,2023,44(12):72-81.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.0679.
OU Jiajia, CHEN Di, LONG Weiguo, et al. Research on global stability of K6-type single-layer spherical timber reticulated shells[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(12): 72-81. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0679. (in Chinese)
- [2] 刘健,周家伟,汪儒灏,等.考虑板式节点刚度大跨度铝合金单层网壳稳定承载力[J].建筑结构学报,2022,43(增刊1):10-19.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0002.
LIU Jian, ZHOU Jiawei, WANG Ruhao, et al. Stability bearing capacity of long-span aluminum alloy single-layer reticulated shells accounting for rigidity of gusset joints [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(Suppl.1): 10-19. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.S1.0002. (in Chinese)
- [3] 王凌旭,姚瑶,张有佳,等.考虑半刚性的耐候钢角钢K形节点抗弯性能有限元分析[J].建筑钢结构进展,2023,25(5):32-41.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.05.004.
WANG Lingxu, YAO Yao, ZHANG Youjia, et al. Finite element analysis of the flexural behavior of weathering steel angle K-joints considering semi-rigidity [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(5): 32-41. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.05.004. (in Chinese)
- [4] 赵雷,齐欣,郑腾虎,等.初始几何缺陷对跨层平面桁架稳定承载力的影响[J].建筑钢结构进展,2022,24(4):66-73. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.009.
ZHAO Lei, QI Xin, ZHENG Tenghu, et al. Influence of initial geometric imperfection on the stability bearing capacity of a cross-story plane truss [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(4): 66-73. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.009. (in Chinese)
- [5] 王燕,李华军,厉见芬.半刚性梁柱节点连接的初始刚度和结构内力分析[J].工程力学,2003,20(6):65-69. DOI:10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.012.
WANG Yan, LI Huajun, LI Jianfen. Initial stiffness of semi-rigid beam-to-column connections and structural internal force analysis [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 65-69. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.012. (in Chinese)
- [6] 邹阿鸣,李全旺,何铭华,等.基于三折线半刚性节点模型的碗扣式脚手架受力性能有限元分析[J].建筑学报,2016,37(4):151-157. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2016.04.020.
ZOU Aming, LI Quanwang, HE Minghua, et al. FEA on bearing behavior of cuplock scaffold based on tri-linear semi-rigid joint model [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 151-157. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.04.020. (in Chinese)
- [7] 胡长明,郭艳,田鹏刚,等.插口式模板支架承载性能试验及数值分析[J].长安大学学报(自然科学版),2016,36(6):78-87. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2016.06.011.
HU Changming, GUO Yan, TIAN Penggang, et al. Experiment and numerical analysis on bearing capacity of socket-spigot template supporting systems [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(6): 78-87. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2016.06.011. (in Chinese)
- [8] MOHAMMED D R, ISMAEL M A. Effect of semi-rigid connection on post-buckling behaviour of frames using finite element method [J]. Civil Engineering Journal, 2019, 5(7): 1619-1630. DOI: 10.28991/cej-2019-03091358.
- [9] 杨雪皎,叶华,王章朋,等.三维激光扫描技术的特异性建筑施工检测应用[J].测绘科学,2020,45(10):71-76,91. DOI:10.16251/j.cnki.1009-2307.2020.10.011.
YANG Xuejiao, YE Hua, WANG Zhangpeng, et al. Application of 3D laser scanning technology to monitor the specific building construction detection [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(10): 71-76, 91. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2020.10.011. (in Chinese)
- [10] 袁雪霞,金伟良,鲁征,等.扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J].土木工程学报,2006,39(5):43-50. DOI:10.3321/j.issn:1000-131X.2006.05.007.
YUAN Xuexia, JIN Weiliang, LU Zheng, et al. A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 43-50. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-131X. 2006.05.007. (in Chinese)
- [11] GAO H, GAO W, LI C X, et al. Influence of the structural performance of steel tubular scaffold based on measured imperfection [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, (256/257/258/259): 754-757. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.256-259.754.
- [12] DONG J F, LIU H Q, ZHAO Z W. Buckling behavior of a wheel coupler high-formwork support system based on semi-rigid connection joints [J]. Advanced Steel Construction, 2022, 18(1): 425-435. DOI: 10.18057/IJASC.2022.18.1.1
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑施工临时支撑结构技术规范:JGJ 300—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Temporary Support Structures in Construction: JGJ 300—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load Code for Design of Building Structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [16] SHERBOURNE A N, BAHAAARI M R. Finite element prediction of end plate bolted connection behavior. I: parametric study [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(2): 157-164. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:2(157).
- [17] 李会军, 何双华, 龙婷婷. 节点刚度对含有缺陷杆件网架稳定性的影响 [J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(4): 10-20, 35. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.002.
- LI Huijun, HE Shuanghua, LONG Tingting. Effect of joint stiffness on the stability of space truss with imperfect members [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(4): 10-20, 35. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.002. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 钢结构用高强度大六角螺栓、大六角螺母、垫圈技术条件: GB/T 1231—2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Specification of High Strength Bolts with Large Hexagon Head, Large Hexagon Nuts, Plain Washers for Steel Structures: GB/T 1231—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [19] 庄金平, 蔡雪峰, 郑永乾, 等. 高大模板扣件式钢管支撑系统整体受力性能研究 [J]. 土木工程学报, 2016, 49(10): 57-63, 87. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.10.009.
- ZHUANG Jinping, CAI Xuefeng, ZHENG Yongqian, et al. Study on the overall stability of high and large formwork support system with fastening style steel pipe [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 57-63, 87. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.10.009. (in Chinese)