

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.032

# 桁架节点不同有限元分析建模方法的探讨

费业刚<sup>1</sup>, 曹亚<sup>2</sup>

(1.北京迈达斯技术有限公司,北京市100073; 2.山东高速建设管理集团有限公司,山东济南250000)

**摘要:**钢桁梁节点进行有限元数值模拟分析时,采用多尺度模型方式或者节点模型方式进行分析较为常见,以多尺度模型计算结果为参考,采用位移边界和内力边界综合施加方式建立的节点模型的结果与其相差较小,两种方式的模型均可以用于节点分析。结合某一顶推施工的钢桁梁最大悬臂施工状态时的节点,利用有限元软件MIDAS Civil和MIDAS FEA NX,采用不同的单元类型(梁单元或实体单元)对节点进行分析对比,确定节点模型用于实际工程的节点分析更具有优势。此结论可为相似工程的节点分析提供参考。

**关键词:**钢桁梁;节点分析;多尺度模型;节点模型;位移边界;内力边界;MIDAS

中图分类号:U448.21+1

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)04-0119-05

## 0 引言

钢桁梁桥结构以其受力好、质量轻、满足较高强度和刚度要求等优点,成为跨越河流、深沟峡谷的理想桥型。该类桥梁的施工方法有多种形式,其中顶推施工具有不影响桥位处交通状况、施工设备少、安全可靠和缩短工期等优点成为此类桥梁常用的施工方法之一<sup>[1]</sup>。

钢桁梁随着顶推施工过程进行,在不同施工阶段钢桁梁节点受力不同,且节点应力差异较大,为保证施工过程中钢桁梁结构安全,有必要对受力较为集中的节点进行分析。节点分析方式主要有2种:

(1)多尺度模型,即采用板单元或者实体单元建立节点模型,然后将其嵌入到由杆系单元(梁单元)或板单元建立的整体模型中进行分析;

(2)节点模型,即根据圣维南原理<sup>[2]</sup>在整体模型中隔离出节点细部结构建立局部模型。从查阅的文献可知,节点模型采用的边界形式有位移边界、内力边界和位移边界及内力边界的综合施加方式,且位移边界和内力边界的综合施加方式采用的较多<sup>[3]</sup>。位移边界和内力边界的综合施加方式是对节点的某杆件端部施加边界约束和支座强制位移,其他杆件端部施加内力荷载进行设置。

本文通过一个工程案例,选取钢桁梁顶推施工过程中最大悬臂状态时的受力较为集中的节点,采用不同模型进行分析和对比结果,从而给其他工程

的节点选取模型方式进行分析提供参考。

## 1 工程概况

某桥为1×108 m无竖杆整体节点平行桁三角桁架下承式钢桁梁,节间长度12 m,桁高为12 m。两片桁间距13.6 m,行车道宽10 m。主桁杆件采用Q370qE钢材,上平纵联、横联及桥面系采用Q345qE钢材。图1为MIDAS Civil建立的桥梁最大悬臂状态整体三维模型。

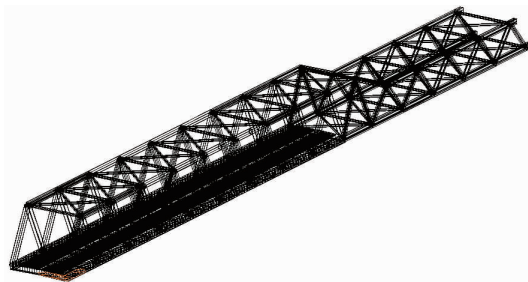


图1 MIDAS Civil建立的桥梁最大悬臂状态整体三维模型

该桥在顶推施工过程中不同节点受力不同,对比分析各施工过程中的节点受力情况,选取桥梁在顶推施工中最大悬臂状态时的节点进行分析,节点选取位置见图2。

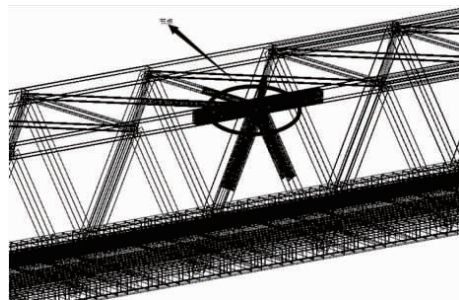


图2 选取的节点位置示意图

收稿日期:2022-05-12

作者简介:费业刚(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁技术支持工作。

该节点由7根杆件组成,杆件材料均为钢材,杆件、杆端结点编号和杆件局部坐标系见图3,杆件及杆件尺寸见表1。

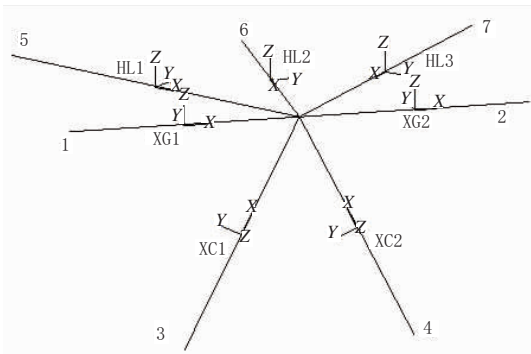


图3 节点杆件、杆端结点编号及局部坐标系示意图

表1 杆件编号及截面尺寸

杆件编号	截面组成 /mm	杆件编号	截面组成 /mm
XG1	2-850 × 40	XC2	2-900 × 32
	2-1080 × 40		1-784 × 28
	4-200 × 40	HL1、HL3	2-400 × 20
XG2	2-850 × 44		1-380 × 14
	2-1088 × 44		1-420 × 20
XC1	4-200 × 44	1-420 × 14	HL2
	2-900 × 28	1-420 × 14	
	1-792 × 20		

## 2 有限元模型分析前提

### 2.1 计算软件和单元类型

采用通用有限元分析软件 MIDAS Civil 2021 (v2.1) 和实体有限元软件 MIDAS FEA NX 2022 R1 进行分析,钢桁梁整体模型和多尺度模型中的节点局部模型均是由 MIDAS Civil 建立分析,位移边界和内力边界综合施加方式的节点模型由 MIDAS Civil 导入到 MIDAS FEA NX 中进行分析。

为了精确计算节点区域不同位置受力情况,确定受力不利位置,以便于指导施工或者设计,节点模型采用实体单元进行建模。实体有限元软件 MIDAS FEA NX 中的实体单元类型有四面体网格单元和混合网格单元(以六面体为主导的网格单元),因为各杆件的截面不同,进行焊接时存在截面之间有错位,同一钢板厚度方向受力不同,所以采用实体单元可分析板厚方向的受力,则实体单元适用于本案例的节点细部分析。

### 2.2 节点模型尺寸和单元网格尺寸

选取节点模型各杆件尺寸大小时,根据圣维南原理,杆件端部因为施加的位移边界和内力边界应力分布存在显著的变化,但是距离端部远处应力分布所受边界约束的影响较小且可不计,所以选择节

点模型的杆件长度尽可能的长,本案例节点模型的尺寸见图4。

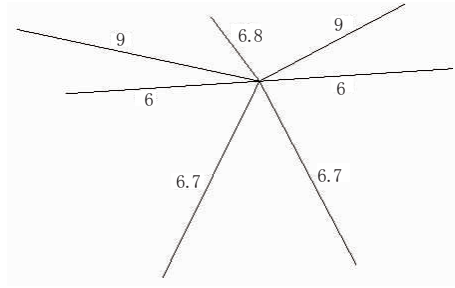


图4 节点各杆件尺寸示意图

单元划分采用 MIDAS FEA NX 的四面体网格单元自动划分网格功能,网格尺寸大小控制在 200 mm 以内,节点模型见图5。

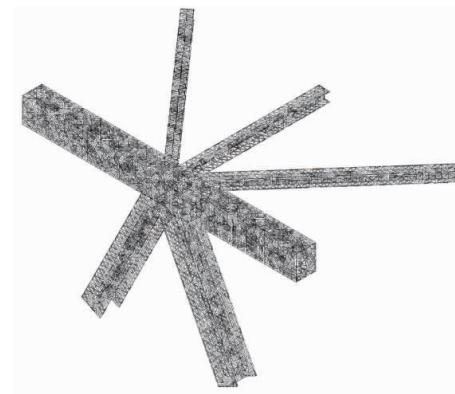


图5 节点有限元模型

### 2.3 节点模型材料

节点模型各杆件使用材料见表2。

表2 杆件材料表格

杆件编号	材料类型	弹性模量 /MPa	本构关系
XG1/XG2/XC1/XC2	Q370qE	2.06E+05	线弹性理论模型
HL1/HL2/HL3	Q345qE	2.06E+05	线弹性理论模型

### 2.4 节点位移值和杆端内力值提取

对比节点模型和多尺度模型结果差异,需要从整体模型中提取节点各杆件杆端结点的位移值和内力值。根据整体模型的分析结果,在施工荷载自重作用下,即自重系数为 1.0 作用下,节点各杆件杆端结点位移值和内力值作为节点模型的边界条件。结合图3中的杆端结点的编号,杆件端部结点的位移值和内力值分别见表3和表4。

位移值包含线位移值和角位移值,则表3中的位移值为整体模型中整体坐标系 X 轴、Y 轴和 Z 轴方向分量值。

表4中的内力值均为各杆件的单元局部坐标系下 x 轴、y 轴和 z 轴的方向的内力分量值。其中杆件 XG1、XC1、XC2、HL1、HL2、HL3 内力值为梁单元的 i 端内力值(单元局部坐标轴的开始端内力值),杆件

表3 节点模型杆件端部结点位移

杆件编号	Dx/mm	Dy/mm	Dz/mm	Rx/rad	Ry/rad	Rz/rad
1	16.768	1.814	2.438	0.885	1.255	0.909
2	20.835	2.009	-4.035	0.786	1.004	0.583
3	11.633	1.323	2.34	1.184	0.971	-3.692
4	11.940	1.678	1.276	1.219	0.991	2.089
5	16.833	1.251	-2.209	0.368	0.852	1.414
6	18.435	1.113	0.106	-0.846	1.111	1.188
7	20.996	1.024	-8.749	0.060	1.331	1.391

表4 节点模型各杆件端部结点内力

杆件编号	轴向 -Fx/kN	剪力 -Fy /kN	剪力 -Fz /kN	扭矩 -Mx/ (kN·m)	弯矩 -My/ (kN·m)	弯矩 -Mz/ (kN·m)
XG1	10 592.84	0.23	107.08	5.25	-240.84	3.63
XG2	15 345.20	1.60	-15.38	-0.45	-574.14	-24.87
XC1	5 192.43	-28.52	14.97	0.01	43.82	-10.90
XC2	-5 777.96	-5.51	25.61	-0.02	69.04	14.97
HL1	233.66	0.27	0.37	-0.01	28.72	0.13
HL2	-600.32	-0.10	-0.83	0.00	21.83	0.28
HL3	511.66	-0.48	-0.22	0.01	24.88	0.08

XG2 内力值为梁单元的 j 端内力值 (单元局部坐标轴的结束端内力值)。

### 3 边界和荷载施加方式

为了保证节点模型的结果准确性,正确施加位移边界和荷载边界之前,需要明确位移和荷载的施加方向。在建立节点模型时,要确保节点模型坐标系和整体模型的坐标系一致。则在节点模型杆端施加位移边界时,可以直接使用表3中的位移值。内力边界添加时,需要根据 MIDAS Civil 梁单元内力提取的结果值的正负号并结合 MIDAS FEA NX 各杆件局部坐标轴,需要将表4中内力值进行正负号处理,以便于作为荷载边界添加到节点模型中。因为表格4中的内力值除了 XG2 对应的结果为其杆件 j 端结果,其他为各杆件 i 端的结果,所以将表中的内力作为边界添加到节点模型中时,XG1、XC1、XC2、HL1、HL2、HL3 端部内力除了“弯矩 -My”正负号不变,其他内力方向均乘以 -1 改变正负号,XG2 端部内力值不改变正负号,但“弯矩 -My”正负号改变。确定完荷载值和方向后,将荷载依据节点模型中的杆端的局部坐标系和整体模型各杆件坐标系对应原则进行添加。

因为一维梁单元分析时,边界和荷载是等效到杆件截面形心轴进行分析的,所以建立节点模型的时候,需要在各杆端截面位置建立对应的形心点,并

将位移值和内力值施加在形心点上。建立的这些形心点需要和杆端截面上的结点通过刚性连接的方式进行连接,主节点为各杆件端截面的形心点,从节点为各杆件端截面上的结点,约束形式为刚性约束,以确保位移和力准确传递。

#### 3.1 多尺度模型

在 MIDAS Civil 中,将节点实体有限元模型代替整体模型中的节点梁单元,并通过刚性连接中的刚性约束连接梁单元和节点实体模型,进而建立成多尺度模型,且该模型的所有分析参数和分析工况与整体模型均相同。多尺度模型中节点局部截图见图6。

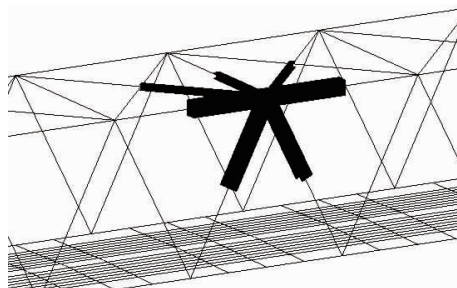


图6 多尺度模型的节点局部截图

#### 3.2 节点模型

将节点从 MIDAS Civil 整体模型中隔离出来,导入 MIDAS FEA NX 建立节点实体有限元模型,在杆件 XG1 端部 1 号结点位置施加固定约束,即约束结点的 6 个方向的自由度,然后在该结点通过强制位移将表3中的 1 号结点的位移值施加。节点模型中其他杆件端部截面的形心点施加内力边界,该内力值为将表4中内力值进行处理后的值。位移边界和内力边界综合施加的节点模型见图7。

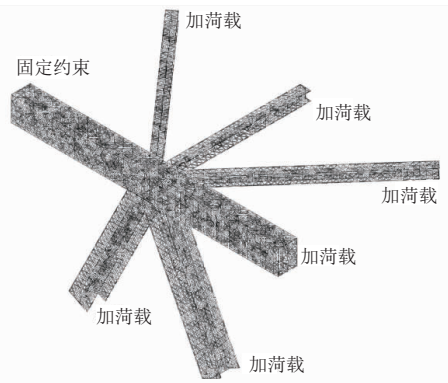


图7 位移边界和内力边界综合施加模型示意图

### 4 分析结果及对比

#### 4.1 整体模型分析结果

钢桁梁桥在顶推施工过程中主要承受自重荷载,则整体模型在自重作用下节点各杆端结点的位移和梁单元应力图分别见图8和图9。



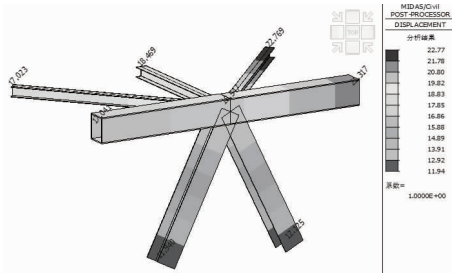


图8 整体模型节点各杆端结点位移图(单位:mm)

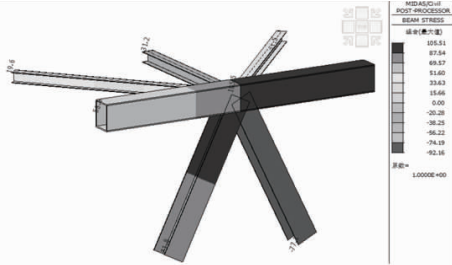


图9 整体模型中节点梁单元最大组合应力图(单位:MPa)

#### 4.2 多尺度模型分析结果

多尺度模型中节点杆端位移图和实体单元 von Mises 应力图分别见图 10 和图 11。



图10 多尺度模型节点实体单元位移图(单位:mm)



图11 多尺度模型节点实体单元 von Mises 应力图(单位:MPa)

为了判断节点实体单元应力最大位置 von Mises 应力分布情况,取图 11 中最大应力位置的局部实体单元进行查看应力云图见图 12。

#### 4.3 节点模型分析结果

节点模型的位移图和实体单元 von Mises 应力图分别见图 13 和图 14。

为了判断节点模型局部单元应力最大位置 von Mises 应力分布情况,取图 14 中最大应力位置的局部单元进行查应力云图见图 15。

#### 4.4 结果对比分析

进行节点局部分析的目的是获得到应力值及其

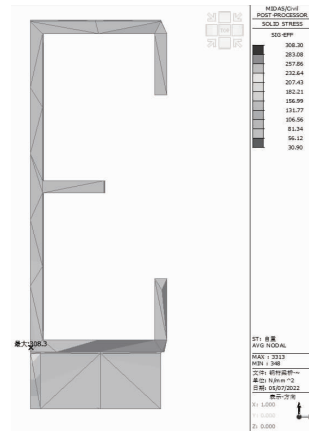


图12 多尺度模型节点实体局部单元 von Mises 应力图(单位:MPa)

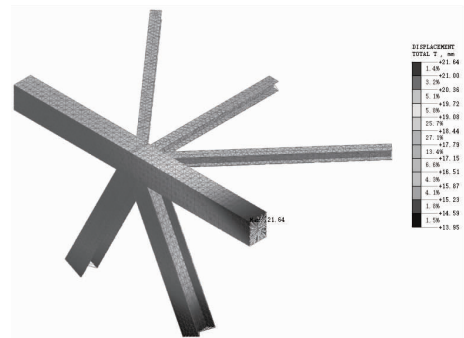


图13 节点模型位移图(单位:mm)

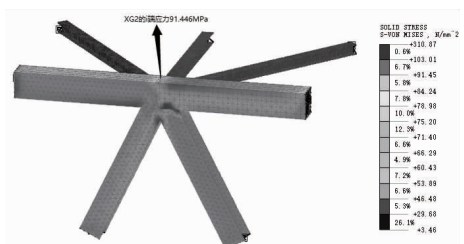


图14 节点模型 von Mises 应力图(单位:MPa)

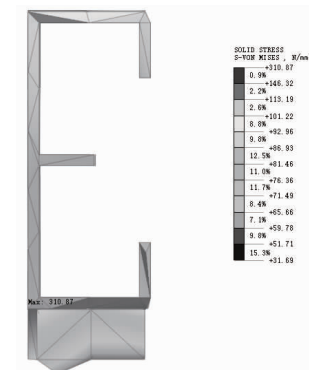


图15 节点模型局部单元 von Mises 应力图(单位:MPa)

应力云图,以便于指导设计和施工。但是在做这些工作前需要验证节点局部分析结果的正确性。本案例中,在各模型中以杆件 XG2 的 i 端位置的实体单元的 von Mises 应力最大值和整体模型中的组合应力最大值进行对比,以确定节点应力结果的正确性。各模型中杆件 XG2 的 i 端应力对比结果见表 5。

表5 各模型中杆件 XG2 的 i 端应力对比

模型名称	杆件 XG2 的 i 端的最大 von Mises 应力值 /MPa	节点位置 von Mises 应力最大 /MPa
整体模型	105.50	—
多尺度模型	93.70	308.30
节点模型	91.45	310.87

综合表 5 的应力结果数据和图 8 到图 15 的节点位移图和节点应力图可知:

(1)从应力图来看,以多尺度模型应力为参考,节点模型的应力分布趋势与其相同,且应力数值基本一致,相差百分率为 2.4%,则节点模型可用于节点应力分析。另与整体模型应力结果对比,相差最大百分率为 11.2%,且均小于梁单元结果,说明节点各杆件截面设计较为保守,截面尺寸还可优化,以便于节省材料和降低成本。

(2)从图 12 和图 15 可知,局部应力分布不均匀,在杆件与杆件连接位置出现了应力集中的现象,但该位置应力迅速扩散,应力值降低到所用钢材最小允许应力 210 MPa 以下。因此,建议施工过程中进行焊接时,对应力集中部位的焊缝应加强质量管理<sup>[4]</sup>。

(3)从位移图来看,以多尺度模型位移结果为参考,节点模型杆端位移云图分布规律与其一致,位移值相差较小,数值分别为 21.95 mm 和 21.64 mm,相差百分率为 1.4%,两模型位移分布虽然和整体模型位移分布不相同,但是位移数值相差较小,对应整体模型的杆件 XG2 的 j 端位移值为 21.317 mm,相差百分率最大为 3%。因此,进行变形验算时,整体模

型、多尺度模型和节点模型结果均可参考。

## 5 结 语

本文通过某一钢桁梁工程案例,选取顶推施工过程中钢桁梁最大悬臂状态受力较大的某一节点,使用 MIDAS Civil 和 MIDAS FEA NX 建立了整体梁单元模型、多尺度模型和节点模型进行分析对比。通过分析对比可知,多尺度模型和采用位移边界及内力边界综合施加方式建立节点模型的位移结果和应力结果基本一致,且位移结果和整体模型基本一致,最大相差百分率为 3%;但是应力结果和整体模型相差稍大,相差百分率 11.2%,且小于整体模型梁单元应力结果。另从加强施工焊接质量管理考虑,整体模型无法反应节点局部应力集中现象,建议采用多尺度模型或者节点模型进行分析来确定应力集中位置。

综上所述,进行节点有限元分析可以采用多尺度模型或者节点模型,但是当考虑建模和计算效率时,位移边界和内力边界综合施加方式建立节点模型用于实际工程更具有优势。

### 参考文献:

- [1] 慕洪江,包龙生,于玲.钢桁梁桥顶推施工的受力分析与优化设计[J].北方交通,2018(4):1-5.
- [2] 徐芝纶.弹性力学简明教程(第五版)[M].北京:高等教育出版社,2018.
- [3] 徐宇鸣,奚彩亚.节点有限元分析中边界与荷载的施加方式探讨[J].建筑结构,2015(增刊):729-734.
- [4] 方志.上海闵浦二桥钢桁梁节点的应力分析[J].交通科技,2009(4):4-6.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)