

基于多尺度数值分析方法的连续钢桁梁桥 受力性能分析

安鹏¹, 王文炜^{2*}

(1. 中铁二十局集团有限公司, 西安 711016; 2. 东南大学交通学院, 南京 211189)

摘要: 为研究大跨度连续钢桁梁桥施工阶段的受力情况,对连续钢桁梁桥的竖向变形和关键节点应力进行了现场实测。依据变形协调原理,建立了节点实体与杆系相结合的多尺度数值分析模型,得到了桥梁成桥阶段的结构整体内力和局部节点受力情况,将桁杆变形和应力的实测值与有限元计算值进行了对比分析。结果表明,下弦杆竖向最大变形值小于6 cm,变形值与计算跨径之比小于1/2 300;杆件实测应力最大值为32 MPa,位于E8节点下弦杆附近。最大变形值和应力值均满足设计规定要求。下弦杆竖向变形实测值与计算值变化趋势基本一致,两者差值小于10 mm,误差平均值和相对误差平均值分别为1.27 mm和6.8%;杆件应力实测值与计算值的误差平均值和相对误差平均值分别为4.5 MPa和11.2%,从而验证了建立的有限元分析模型的有效性。多尺度分析模型与杆系模型计算的竖向变形与实测变形值一致性较好,最大位移误差小于5%、应力误差小于6%。无论是多尺度模型还是杆系模型,节点应力计算值的平均值和跨中竖向变形计算值的平均值与实测值均具有一定的偏差,相对误差均小于20%。因而,多尺度模型能够很好地反映节点局部受力情况。

关键词: 连续钢桁梁桥; 成桥阶段; 多尺度模型; 实桥测试; 受力特点; 有限元分析

中图分类号: U448.211

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0065-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240127001

Analysis of the Mechanical Performance of Continuous Steel Truss Bridges Using a Multi-Scale Numerical Analysis Method

AN Peng¹, WANG Wenwei^{2*}

(1. China Railway 20th Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 711016, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

*Corresponding author: wangwenwei@seu.edu.cn

Abstract: To thoroughly investigate the stress states during the construction stage of a long-span continuous steel truss bridge, field measurements were conducted to assess the vertical deformations and stresses at critical joints. Based on the principle of deformation coordination, a multi-scale numerical analysis model was developed, integrating joint entities and member systems, to capture the overall internal forces and local joint stress states of the bridge during its service stage. A comparative analysis was then performed, comparing the measured values of truss member deformations and stresses with the calculated values obtained from finite element analysis. The results indicate that the maximum vertical deformation of the bottom chord remains below 6 cm, representing a ratio less than 1/2300 to the calculated span. Additionally, the maximum measured stress in the member, located near the bottom chord of joint E8, is

收稿日期: 2024-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(51878156), 中铁二十局集团科技研发项目(YF2201QL01B)

作者简介:

安鹏(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事道路、桥梁施工及管理方面的研究。E-mail: 409236516@qq.com。

通信作者:

王文炜(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事新材料在桥梁结构中的应用方面的研究。E-mail: wangwenwei@seu.edu.cn。

32 MPa. Both the maximum deformation and stress values satisfy the design specifications. The measured and calculated values of the vertical deformation of the bottom chord exhibit a general consistency, with a discrepancy of less than 10mm. Specifically, the average error and average relative error are 1.27 mm and 6.8% respectively. Similarly, the average error and average relative error between the measured and calculated stress values of the members are 4.5 MPa and 11.2%, respectively, validating the effectiveness of the established finite element analysis model. When comparing the vertical deformations calculated by the multi-scale analysis model and the bar system model with the measured values, a good agreement is observed, with a maximum displacement error of less than 5% and a stress error of less than 6%. Both the multi-scale model and the bar system model exhibit a certain deviation in the average calculated values of joint stress and mid-span vertical deformation from the measured values, but these deviations remain within a relative error of less than 20%. However, the multi-scale model is particularly adept at accurately reflecting the local stress states at the joints.

Keywords: continuous steel truss bridge; service stage; multi-scale numerical analysis model; real bridge test; stress characteristics; finite element analysis

连续钢桁梁桥自重轻,可采用预制方式进行生产制作,施工速度快^[1],适用于大跨度桥梁的建造^[2],被广泛应用于公路和铁路桥梁工程中^[3-4]。为确保连续钢桁梁桥的施工安全,分析施工过程中的受力特征、确定结构最不利受力位置和受力情况显得尤为重要^[5-6]。

中派河大桥主桥为三跨连续钢桁架结构(86+140+90 m)。钢桁架由两片主桁组成,桥梁主体结构全宽23.2 m。主墩横桥向为分离式桥墩,下设分离式承台,采用钻孔灌注桩群桩基础。上部结构主要构件有主桁架、上下平联和桥面纵横梁。主桁架上弦杆呈现折线形轮廓,桁高最大值为22 m。弦杆均采用箱形截面构造,腹杆在近支座区域设计为箱形截面,其余则采用工字型截面。主体结构运用栓焊结合的整体节点技术,所有构件均在工厂预制生产,并于现场进行焊接连接或高强螺栓连接。桥型布置图如图1所示。

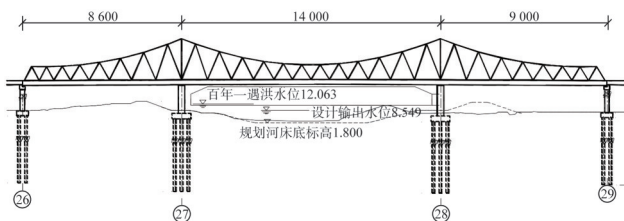


图1 中派河特大桥梁型布置图(单位:mm)

Fig. 1 Layout of Zhongpai River extra large bridge type (unit: mm)

多尺度有限元法的基本思想最早源于BABUSKA等^[7]提出的广义有限元法和非多项式形式的基函数。随着该方法的不断发展和完善,其逐渐应用于工程结构领域。把精细的有限元模型植入宏观模型,通过使微观模型与宏观模型采用合适的界面连接起来,实现不同尺度模型间的变形协调^[8]。王楚清等^[9]采用多尺度有限元分析方法分析了输电塔的整体和局部的受力行为,计算结果与试验结果差值较小。周萌等^[10]对系杆拱桥拱脚采

用多尺度有限元方法分析,探究了拱脚连接结构的受力性能,计算结果与全桥采用精细有限元分析得到的结果吻合较好。因此,将多尺度有限元分析方法引入钢桁梁桥整体节点分析中,对于研究整体节点的细节设计具有重要的理论意义。本文以中派河大桥为依托工程,基于局部实体和杆系相结合的方法构建了多尺度分析模型,依据变形协调原理,建立了考虑节点精细构造的数值分析模型,计算成桥状态下桥梁使用时的结构内力,将杆件变形和应力实测结果与有限元计算结果进行了对比分析。

1 数值分析

1.1 有限元模型

1) 全桥有限元模型

采用有限元软件Midas/Civil建立全桥空间有限元模型,考虑桥面板与钢桁梁的共同作用,有三种模拟板桁体系的方法:铰接平面分析法、空间梁单元模型法、板壳和梁单元组合分析法^[11]。铰接平面法是在确定桥面板有效宽度的基础上,将桥面板简化为桁架;空间梁单元模型法是通过将桥面板的刚度和质量合理分配,将其等效模拟成纵横梁形式,然后按照空间梁单元来分析;板壳和梁单元组合分析法是采用梁单元和板单元相连接的方式进行模拟^[10]。比较三种方法,板壳和梁单元组合分析法具有模拟准确性高、便于施加外荷载的特点。故本文采用第三种方法进行建模模拟,共建立节点261个,单元598个(其中梁单元458个,板单元140个)。主桁及桥面系均采用Q345钢材,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为0.3,密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。全桥有限元模型如图2所示。



图2 全桥有限元模型

Fig. 2 Finite element model of bridge

2) 节点有限元模型

根据全桥内力计算结果,主墩附近下弦杆的拉力和负弯矩均较大,节点受力情况复杂,需要采用杆系有限元与节点局部精细化建模方法进行分析。将已建立好的Midas杆系模型结构导入到ABAQUS有限元软件中,与建立的节点局部实体模型耦合,得到全桥杆系模型与多尺度模型,如图3所示。

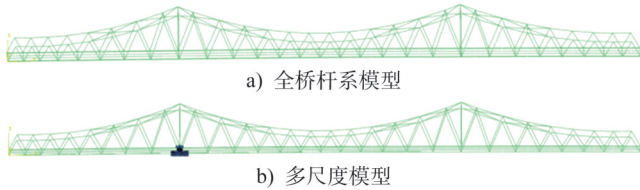


图3 模型对比

Fig. 3 Model comparison

在多尺度模型中,将中支点附近包括下弦杆、直腹杆与斜腹杆相交处的节点作为实体单元,考虑高强螺栓的连接,将节点局部模型与全桥杆系模型进行统筹分析。在建模过程中,考虑局部结构的尺度精细度高、整体结构的尺度大,界面连接表现为实体单元与杆单元之间的连接。在考虑单元连接时,考虑到单元自由度和连接处单元数量与位置的差异,为达到单元间协同受力的效果,需要将划分的单元节点施加接触约束。

节点由下弦杆和3根腹杆通过螺栓拼接而成,根据下弦杆节段预制长度,节点处下弦杆长度取为8 600 mm。由圣维南原理可知,为避免局部应力集中对节点受力的影响,腹杆长度取对应螺栓孔阵列一倍的长度,即斜腹杆与直腹杆长度分别取2 800 mm和3 000 mm,节点处构造及尺寸如图4所示。

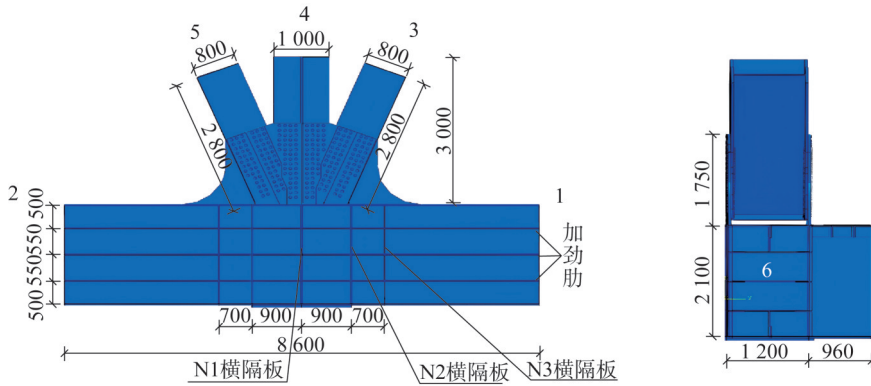


图4 节点构造及尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Joint construction and dimensions (unit: mm)

在ABAQUS中建立模型,在节点处采用C3D8R实体单元,其他杆件采用Beam32三维二次梁单元。采用Coupling约束对梁单元与实体单元界面进行连接,如图5所示。

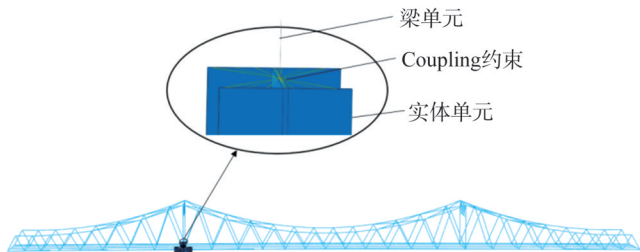


图5 节点有限元模型界面连接

Fig. 5 Joint finite element model interface connection

节点处采用高强螺栓将腹杆与节点板连接,螺栓与板之间、板与板之间的接触属性切向设置为摩擦接触,法向设置为刚性无渗透接触。钢材弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为0.3。节点板底部设置支座垫板,通过

参考点与垫板耦合约束,对参考点施加三向水平位移约束,其余位移约束施加在相对应的支座位置处,与全桥杆系模型边界条件一致。

1.2 内力计算结果

考虑恒载、活载、基础变位、温度等荷载作用下结构的受力,全桥内力计算结果如图6所示。由图6a)可知,桥梁构件轴力集中于主墩处上下弦杆的位置,具体表现为此处上弦杆受到最大拉力,为15 159.7 kN,此处下弦杆受到最大压力,为11 794.0 kN。由图6b)可知,桥梁剪应力在中跨和边跨分布较为均匀,最大剪力如图所示,为1 070.0 kN。由图6c)可知,桥梁弯矩主要由下弦杆承担,不同节段间弯矩分布相似,最大正弯矩和负弯矩位于节段节点上,而位于主墩处下弦杆位置的最大负弯矩较为突出,为13 237.3 kN·m。

桁架施工过程中的杆件应力包络图如图7和图8所示,结构最大压应力分布在主墩附近的下弦杆及腹杆位置处,最大拉应力分布在主墩上弦杆、斜腹杆位置处。

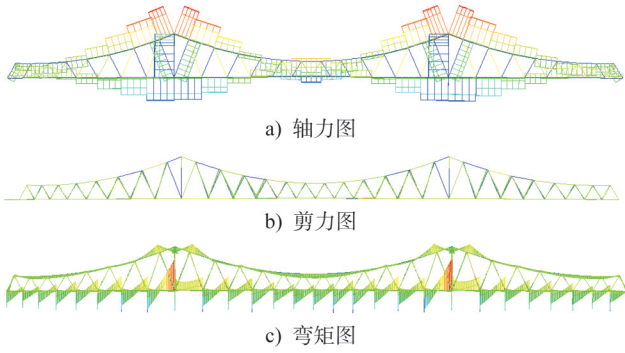


图6 内力计算结果(单位:kN)

Fig. 6 Internal force calculation results (unit: kN)

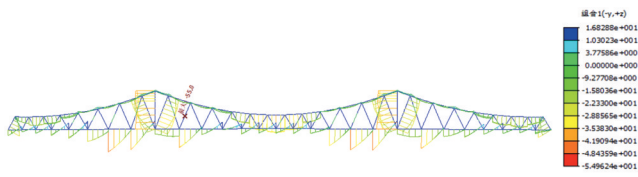


图7 施工过程结构最大压应力分布(单位:MPa)

Fig. 7 Maximum compressive stress distribution in the construction process structure (unit: MPa)

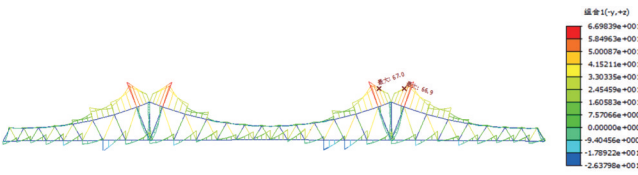


图8 施工过程结构最大拉应力分布(单位:MPa)

Fig. 8 Maximum tensile stress distribution in the construction process structure (unit: MPa)

2 实桥测试

实桥测试工作是对桥梁各部件应力或结构整体变形进行的现场测量,是桥梁建造的必要环节。实桥测试是以设计计算结果为依据,对结构状态进行预测和控制,通过数据采集设备,对结构的关键受力构件指标进行测量,以达到设计计算的要求和标准,保证桥梁结构的安全^[12-13]。

2.1 钢桁梁桥施工过程

中派河大桥上部结构钢桁梁施工采用支架施工法。钢桁梁杆件运输到架设工位后,利用龙门吊对其进行安装,采用两侧中跨主墩分别向跨中及边跨支座拼装的顺序进行对称拼装,最后完成全桥合拢,桥梁施工过程如表1所示。

2.2 线形测试

1) 测点布置

钢桁梁变形测试包含横向与竖向监控。基于施工测

表1 钢桁梁桥施工过程

Table 1 Construction process of steel truss girder bridge

施工阶段	施工过程描述	参考图示
步骤1	从两个中跨主墩向两侧对称拼装	
步骤2	中跨拼装至河道位置,边跨继续拼装	
步骤3	将边跨拼装完毕后拆除副门机,同步拼装合拢主跨下弦杆	
步骤4	中跨拼装,先安装合拢两跨侧主弦桁杆,最后安装桥面系,拆除支架	

量控制网设置基点,在基点上设置精密全站仪,反射棱镜或反射片布设于主要控制截面弦杆的中心线或边缘位置。利用全站仪采集待测点平面坐标变化量,通过与理论值对比,得到各施工阶段的误差值。对于本桥施工,每次在桁架拼装及合拢后均需进行测量,测点布置如图9所示。

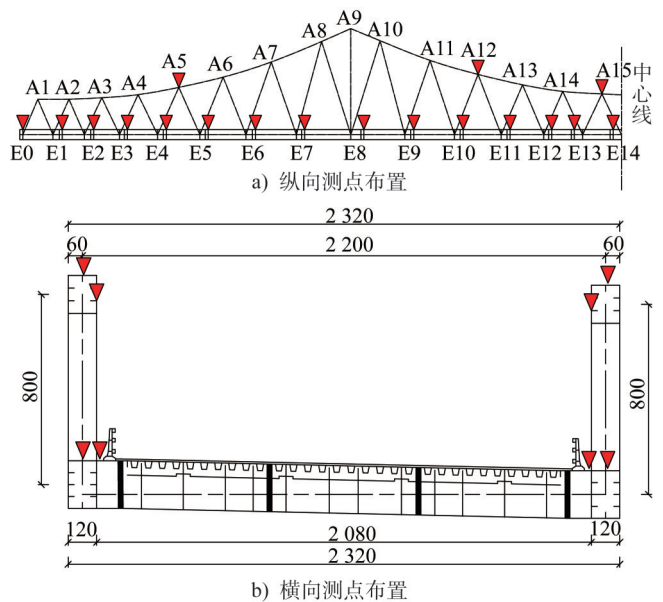


图9 钢桁梁位移测点布置示意图

Fig. 9 Arrangement of the displacement measuring points of steel truss beams

2) 竖向变形测试结果

支架拆除后,对桁架上下弦杆的竖向变形进行监测。受测量误差、温度作用、结构变形、后续构件施工及人为调整等因素综合作用的影响,下弦杆空间位置将发生一定范围的波动,但此时钢桁梁变形达到峰值。基于上弦

杆3个及下弦杆15个监测点的实测数据(对应横向测点取均值),可确定下弦杆竖向最大变形量小于6 cm,其与计算跨径之比小于1/2 300,符合设计规定要求。

2.3 应力测试

1) 测点布置

为确保施工时桥梁结构的安全,检验设计假定的合理性和工程设计的可行性,需对控制截面应力情况进行测试。应变传感器的布设原则为:(1)较为全面反应桥梁当前施工状态的基本信息;(2)获取温度、施工荷载等因素对结构当前状态的影响信息;(3)为主桥拼装、边中跨合拢等监控指令提供数据支撑;(4)反映较不利构件的受力状态;(5)测试信息具有一定的抗干扰能力,不会因为个别传感器的故障造成结构总体信息产生较大误差^[14-16]。

依据上述原则,结合钢桁梁施工阶段初步计算分析结果,识别钢桁架梁中不利受力杆件,据此规划传感元件布设位置。纵向应力测试区域选定为施工过程呈现显著应力响应的区段,于弦杆及腹杆控制区域的顶底表面配置振弦式应变传感器,监测其轴向应力。

选取主墩区域的上、下弦杆截面与斜腹杆截面,以及主跨1/4位置处的斜腹杆截面作为监测截面。全桥共设置14个此类截面,每个截面配置2个应变传感器,总计28个分布点,具体位置如图10所示。现场变形测试和应力测试设备如图11所示。

2) 应力测试结果

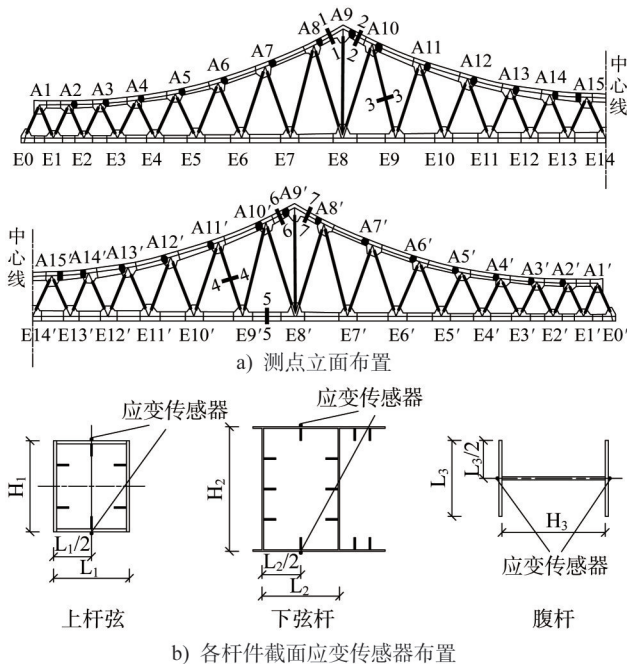


图10 主桁架应力测试测点布置

Fig. 10 Arrangement of the stress measuring points of the main truss



图11 主桁架的变形和应力测试

Fig. 11 Deformation and stress measuring of the main truss

拆除支架后,对各测点应力值进行采集,并依照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[17]中拉弯构件和压弯构件截面的强度计算公式(1)计算各测点正应力。

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \quad (1)$$

式中: N 为受压杆件轴心压力; A_n 为受压杆件净截面积; γ_x 、 γ_y 为截面塑性发展系数; M_x 、 M_y 为同一截面处绕 x 轴和绕 y 轴的弯矩; W_{nx} 、 W_{ny} 为对 x 轴和对 y 轴的净截面模量。

3 计算结果分析

3.1 全桥有限元与实测结果对比

对上弦杆3个测点、下弦杆15个测点的变形测试结果与计算结果进行对比分析,如图12和图13所示。表2给出了各测点的实测值、计算值、计算值与实测值的误差及相对误差。从图中和表中数据可以看出,上弦杆与下弦杆的竖向变形实测值与计算值变化趋势基本一致,计算值与实测值的误差最大值为9.79 mm,对应的相对误差最大值为19.7%。误差平均值和相对误差平均值分别为1.27 mm和6.8%,说明了弦杆竖向变形计算结果的有效性。

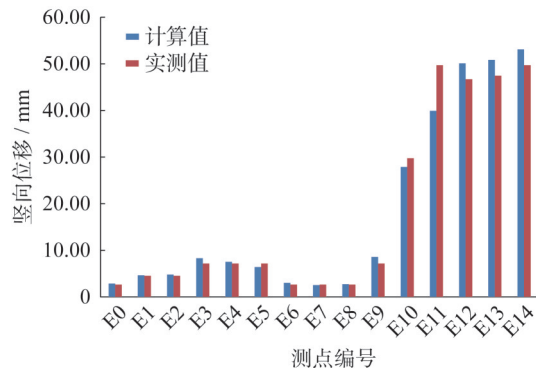


图12 下弦杆测点竖向位移

Fig. 12 Vertical displacement of the lower chord measuring point

图14和表3给出了各测点的应力实测值、计算值及应力实测值与计算值的比较。从中可以看出,各测点应

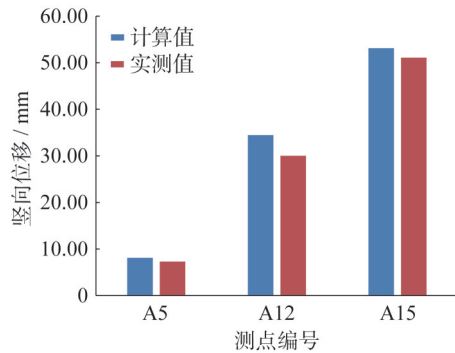


图13 上弦杆测点竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement of the upper chord measuring point

表2 各测点竖向位移计算值与实测值的比较

Table 2 Comparison between calculated and

measured vertical displacements of all measuring points

测点编号	实测值/mm	计算值/mm	差值=计算值-实测值/mm	相对误差= $\frac{\text{计算值}-\text{实测值}}{\text{实测值}}/\%$
E0	2.64	2.87	0.23	8.9
E1	4.52	4.62	0.10	2.2
E2	4.52	4.78	0.26	5.7
E3	7.15	8.28	0.13	15.8
E4	7.15	7.53	0.38	5.3
E5	7.15	6.40	-0.75	-10.5
E6	2.64	3.01	0.37	14.3
E7	2.64	2.53	-0.11	-4.0
E8	2.64	2.72	0.08	3.2
E9	7.15	8.56	1.41	19.6
E10	29.75	27.87	-1.88	-6.3
E11	49.71	39.92	-9.79	-19.7
E12	46.69	50.08	3.39	7.3
E13	47.45	50.84	3.39	7.1
E14	49.71	53.10	3.39	6.8
A5	7.30	8.11	0.81	11.1
A12	30.00	34.46	4.46	14.9
A15	51.08	53.11	2.03	4.0
平均值			-1.27	6.8

力实测值与计算值最大误差为 10.1 MPa, 位于测点 6 (A9'节点位置) 的位置; 相对最大误差为 15.8%, 位于测点 4 (E9'节点至 A11'节点之间的弦杆) 的位置。应力实测值与计算值的误差平均值和相对误差平均值分别为 4.5 MPa 和 11.2%, 说明建立的数值分析模型可以有效预

测节点和杆件的应力。从图中还可以看出, 大部分测点的应力实测值小于计算值, 其原因为: 一方面是施工过程中存在众多不可控因素导致实测结果有偏差; 另一方面是整体模型计算时理论最大值位于单元节点处, 而实际中的测点布置难以位于节点上, 导致测得应力值较小。

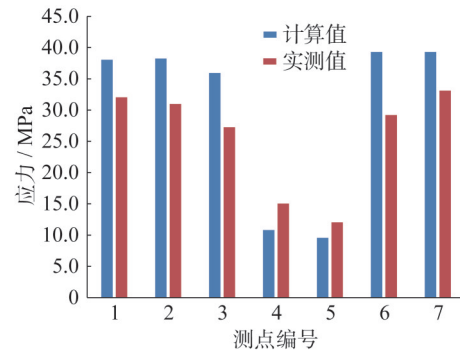


图14 各测点应力值对比

Fig. 14 Comparison of the stress results of all measuring points

表3 各测点应力计算值与实测值的比较

Table 3 Comparison between calculated and measured stress of all measuring points

测点编号	实测值/MPa	计算值/MPa	差值=计算值-实测值/MPa	相对误差= $\frac{\text{计算值}-\text{实测值}}{\text{实测值}}/\%$
1	32.0	38.1	6.1	8.9
2	31.0	38.2	7.2	2.2
3	27.3	35.9	8.6	5.7
4	15.0	10.8	-4.2	15.8
5	12.0	9.6	-2.6	5.3
6	29.2	39.3	10.1	-10.5
7	33.1	39.3	6.3	14.3
平均值			4.5	11.2

3.2 多尺度模型与杆系模型结果对比

根据多尺度模型和杆系模型的位移计算结果, 对比中跨和边跨跨中位移, 如表 4 所示。对比可知, 两模型结果相近, 平均相对误差仅有 2.7%。并且两模型计算结果与实测值相差较小, 验证其计算结果的可靠性。

根据成桥阶段主桁应力测量的数据结果, 按照公式(1)计算测点的截面应力最大值如表 5 所示。从表中可以看出, 多尺度模型模型计算的应力值与杆系模型的计算结果相差均小于 6%, 最大值为 5.9%, 验证了局部实体模型的合理性。然而无论是多尺度模型还是杆系模型 3 个测点的计算值与实测值差值均相对较大, 原因是计算

模型的假定和边界约束条件与实际情况有所不同,导致计算模型中结构整体刚度偏大。

表4 多尺度模型与杆系模型位移比较
Table 4 Comparison of displacement between multi-scale model and bar system model

位移	多尺度模型 ①/mm	杆系模型 ②/mm	实测值 ③/mm	相对误差/%		
				δ_1	δ_2	δ_3
中跨跨中	55.7	53.4	50.0	4.1	10.2	6.4
边跨跨中	8.2	8.1	7.0	1.2	14.6	13.6
平均值				2.7	12.4	10.0

注:表中: $\delta_1 = \frac{① - ②}{①} \times 100\%$; $\delta_2 = \frac{① - ③}{①} \times 100\%$; $\delta_3 = \frac{② - ③}{②} \times 100\%$ 。

表5 多尺度模型与杆系模型应力比较
Table 5 Comparison of stress between multi-scale model and bar system model

应力测点	多尺度模型 ①/MPa	杆系模型 ②/MPa	实测值 ③/MPa	相对误差/%		
				δ_1	δ_2	δ_3
1	37.3	38.0	32.0	-1.8	14.2	15.7
2	37.5	38.1	31.0	-1.6	17.3	18.6
3	33.9	35.9	27.0	-5.9	20.4	24.8
平均值				-3.1	17.3	19.7

注: $\delta_1 = \frac{① - ②}{①} \times 100\%$; $\delta_2 = \frac{① - ③}{①} \times 100\%$; $\delta_3 = \frac{② - ③}{②} \times 100\%$ 。

在与杆系有限元模型一致的荷载组合下,多尺度模型中E8节点处取得最大应力值,为431.3 MPa(图15a))。从节点的应力分布(图15b))可以看出,节点板最大应力值为187.3 MPa,杆件中最大应力值为110.0 MPa。计算结果表明,所有杆件均处于弹性阶段,节点板的应力集中区域主要分布在腹板与横隔板连接处。

分别提取杆系模型与多尺度模型在节点连接处的截面应力进行对比分析,如图16所示。图中1~6连接界面分别表示下弦杆连接端1、2,腹杆连接端3、4、5与横梁连接端6(点位参照图4)。从图中可知,多尺度模型中实体单元与杆系单元在连接界面的应力存在一定的差值,然而相对误差最大值为17.7%,小于20.0%。这种差异是由于两种模型对节点构造的模拟精细程度不同,多尺度模型更准确地模拟了节点的刚度,模型中模拟的横隔板、螺栓连接构造等造成节点刚度不一致,从而应力分配有所不同。

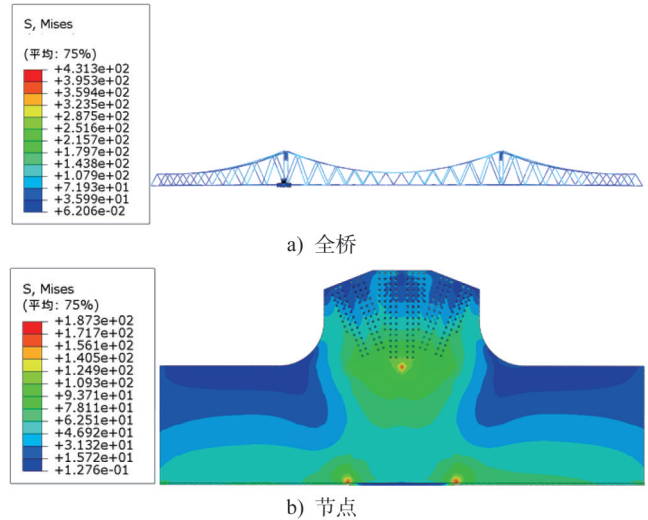


图15 Mises应力分布(单位:MPa)

Fig. 15 Mises stress distribution (unit: MPa)

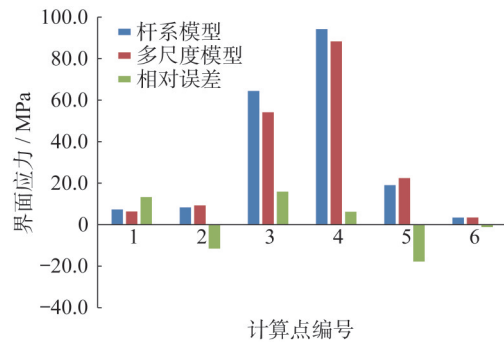


图16 节点端部应力对比

Fig. 16 Comparison of stress at the node end

4 结论

本文为研究大跨度连续钢桁梁桥施工阶段的受力情况,对连续钢桁梁桥的竖向变形和关键节点应力进行了现场实测,并建立了数值分析模型,将计算结果与实测结果进行了对比,结论如下:

(1) 通过建立三跨变高度钢桁梁桥节点多尺度模型与杆系模型相结合的数值分析模型,分析了成桥状态下桥梁使用时整体和局部受力状况。发现位于主墩下弦杆位置的节点受力复杂,应力较大。

(2) 对主桁架纵向变位和关键节点应力进行了现场实测。下弦杆竖向最大变形小于6 cm,变形值与计算跨径之比小于1/2 300。实测应力最大值为32.0 MPa,位于E8节点下弦杆附近,最大变形值和应力值均满足设计规范要求。

(3) 将杆件变形和应力实测结果与有限元计算结果进行了对比分析,竖向变形实测值与计算值变化趋势基本一致,数值相差小于10 mm;应力实测值与计算值相对误差平均值小于6%,验证了多尺度分析模型的有效性。

多尺度分析模型的计算结果表明,节点区域高强螺栓、节点板及杆件的最大应力均小于钢材屈服强度,处于弹性工作阶段。

参考文献:

- [1] 周绪红,刘永健. 钢桥[M]. 北京:人民交通出版社,2020.
ZHOU Xuhong, LIU Yongjian. Steel bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [2] PODKORITOV A, SERDJUKS D, GOREMIKINS V, et al. Behaviour of a space inverted triangular steel truss[J]. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2020, 15(4):54-70. DOI:10.7250/bjrbe.2020-15.494.
- [3] 冯畅. 郑济黄河特大桥连续钢桁梁施工技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2022.
FENG Chang. Research on construction technology of continuous steel truss girder for Zhengji yellow river bridge[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022. (in Chinese)
- [4] 严永阳. 悬臂施工中连续钢桁梁桥结构性能分析与控制技术[D]. 南京:东南大学,2018.
YAN Yongyang. Structural performance analysis and control technology of continuous steel truss bridge during cantilever construction [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [5] 田亮,赵健,李向海. 三门峡黄河公铁两用桥钢桁梁悬臂顶推受力分析[J]. 铁道建筑,2020,60(11):40-43.
TIAN Liang, ZHAO Jian, LI Xianghai. Stress analysis of cantilever incremental launching for steel truss girder of Sanmenxia Yellow River rail-cum-road bridge [J]. Railway Engineering, 2020, 60(11):40-43. (in Chinese)
- [6] 赵汗青,任为东,高静青,等. 长联大跨连续钢桁梁悬臂拼装全过程仿真研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(11):6-11. DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202104260006.
ZHAO Hanqing, REN Weidong, GAO Jingqing, et al. Simulation research on the whole process of cantilever erection of long-connected large-span continuous steel truss girders [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(11):6-11. DOI:10.13238/j.issn.1004-2954.202104260006. (in Chinese)
- [7] BABUŠKA I, CALOZ G, OSBORN J E. Special finite element methods for a class of second order elliptic problems with rough coefficients [J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 1994, 31(4):945-981. DOI:10.1137/0731051.
- [8] 陆新征,林旭川,叶列平. 多尺度有限元建模方法及其在应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版),2008,25(4):76-80.
LU Xinzheng, LIN Xuchuan, YE Lieping. Multiscale finite element modeling and its application in structural analysis[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2008, 25(4):76-80. (in Chinese)
- [9] 汪楚清,王虎长,李亮,等. 大跨越输电钢管塔结构多尺度有限元分析[J]. 工程力学,2013,30(7):147-152,166. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.0189.
WANG Chuqing, WANG Huchang, LI Liang, et al. Multi-scale finite element analysis of steel tube tower for large crossing transmission lines[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7):147-152, 166. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.03.0189. (in Chinese)
- [10] 周萌,宁晓旭,聂建国. 系杆拱桥拱脚连接结构受力性能分析的多尺度有限元建模方法[J]. 工程力学,2015,32(11):150-159. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1023.
ZHOU Meng, NING Xiaoxu, NIE Jianguo. Multi-scale finite element modeling method for mechanical behavior analysis of arch feet on tied arch bridges [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11):150-159. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.11.1023. (in Chinese)
- [11] 李兆峰,牛忠荣,方继,等. 大型连续钢桁梁桥顶推施工中关键节点力学分析研究[J]. 铁道学报,2021,43(4):158-165. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2021.04.020.
LI Zhaofeng, NIU Zhongrong, FANG Ji, et al. Mechanical analysis of key joints of super-spanned steel truss girder in incremental launching construction [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(4):158-165. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2021.04.020. (in Chinese)
- [12] 杨欣,张举兵,李小龙,等. 基于监测数据的钢桁梁桥温度变形研究[J]. 工程力学,2024,41(增刊1):310-316. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S010.
YANG Xin, ZHANG Jubing, LI Xiaolong, et al. Thermal deformation of a steel truss bridge based on monitoring data [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(Suppl. 1):310-316. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S010. (in Chinese)
- [13] 宋洪雨,苏春杰,蔡保硕,等. 混凝土桁架拱桥荷载试验与承载力评价[J]. 特种结构,2024,41(2):51-57,64. DOI:10.19786/j.tzjg.2024.02.010.
SONG Hongyu, SU Chunjie, CAI Baoshuo, et al. Load test and bearing capacity evaluation of truss arch bridges [J]. Special Structures, 2024, 41(2):51-57, 64. DOI:10.19786/j.tzjg.2024.02.010. (in Chinese)
- [14] 娄松,吴芳,江湧,等. 大吨位钢桁梁步履式顶推滑移施工力学行为分析[J]. 桥梁建设,2021,51(1):66-73. DOI:10.3969/j.issn.1003-4722.2021.01.010.
LOU Song, WU Fang, JIANG Yong, et al. Mechanical analysis of walking-type incremental launching and sliding construction of large-tonnage steel truss girder [J]. Bridge Construction, 2021, 51(1):66-73. DOI:10.3969/j.issn.1003-4722.2021.01.010. (in Chinese)
- [15] 崔健. 钢桁架桥节点的优化设计及其有限元分析[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2021.
CUI Jian. Optimal design and finite element analysis of steel truss bridge joints[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021. (in Chinese)
- [16] 何东升,郑清刚,徐伟. 板桁组合结构主桁节点板应力集中系数研究[J]. 桥梁建设,2020,50(3):46-51.
HE Dongsheng, ZHENG Qinggang, XU Wei. Study of stress

- concentration factor for main truss gusset plates in plate-truss composite structure [J]. Bridge Construction, 2020, 50 (3) : 46-51. (in Chinese)
- [17] 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)