

参照多尺度模型的钢桁梁节点刚域优化

刘高成, 刘建, 董创文, 李传习

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 在整体节点钢桁梁桥计算中往往采用带刚臂梁单元模拟整体节点板的刚度增强效应以提高计算精度。该文以中山联石湾大桥为工程背景, 提出并验证了一种以桁梁多尺度模型为参照对节点刚域模拟进行优化的方法。选取5个连续的标准节段作为研究对象, 利用Ansys分别建立刚臂梁单元模型和带节点板子结构的桁梁多尺度模型, 并施加相同的边界与荷载条件。以多尺度模型的主桁挠度作为目标挠度, 通过改变节点刚臂长度使刚臂梁单元模型主桁挠度与目标挠度拟合, 实现挠度拟合时将节点刚臂长度代入全桥模型中进行后续计算, 此过程实现了节点刚臂长度的优化。对优化前后的3种模型进行施工过程和成桥状态的计算分析, 有限元计算结果与实测数据对比表明: 对节点刚域优化后的理论挠度始终与实测数据较吻合, 在最大悬臂工况下, 将节点区域全部视为刚域的理论最大挠度仅占实测值的26.6%, 而不考虑刚域影响的理论最大挠度为实测值的124.1%, 其误差反而小于过高估计刚度的情况, 说明优化后的计算模型较好地模拟了该桥的实际刚度, 而节点刚度增强效应模拟不准确导致的误差反而可能大于忽略刚域的误差。

关键词: 钢桁梁; 节点刚域; 多尺度有限元模型; 模拟优化; 主桁挠度

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

Rigid Domain Optimization of Steel Truss Joint with Reference to Multi-Scale Model

LIU Gaocheng, LIU Jian, DONG Chuangwen, LI Chuanxi

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: The rigidity enhancement effect of the integral gusset plate is often simulated in the calculation of an integral nodal steel truss bridge by using a beam element with a rigid arm to improve the calculation accuracy. By taking Zhongshan Lianshwan Bridge as the engineering background, an optimization method based on a multi-scale truss model for nodal rigid domain simulation was proposed and verified. Five consecutive standard sections were selected as the study objects, and the beam element model with rigid arm and the multi-scale model of gusset plate substructure were established by using Ansys. The same boundary and loading conditions were applied. The deflection of the main truss of the multi-scale model was used as the target deflection, and the deflection of the main truss of the beam element model with a rigid arm was fitted to the target deflection by changing the length of the nodal rigid arm. The length of the nodal rigid arm was substituted into the whole bridge model for subsequent calculations after the deflection was fitted, which optimized the length of the nodal rigid arm. The three models before and after optimization were calculated and analyzed for the construction process and bridge state. The comparison between the finite element calculation results and the measured data shows that the theoretical deflection after optimizing the nodal rigid domain is always in good agreement with the measured data, and under the maximum cantilever condition, the theoretical maximum deflection of the nodal domain is only 26.6% of the rigid domain, while the theoretical maximum deflection without considering the influence of the rigid domain is 124.1% of the measured value. The error is smaller than that under the overestimated rigidity, which indicates that the optimized model simulates the actual rigidity of the bridge better, while the error caused by the inaccurate

收稿日期: 2023-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51778069)

作者简介: 刘高成, 男, 硕士研究生. E-mail: 3247238414@qq.com

simulation of the nodal rigidity enhancement effect may be larger than the error of ignoring the rigid domain.

Keywords: steel truss; nodal rigid domain; multi-scale finite element model; simulation optimization; main truss deflection

0 引言

钢桁梁自重轻、刚度大、便于工业化制造施工,是双层桥主梁的首选,满足了当今交通量快速增长的需要,应用广泛^[1-5],例如近年建成的重庆红岩村嘉陵江大桥^[6]、新白沙沱长江大桥^[7]、平潭海峡公铁大桥^[8]、牛田洋大桥^[9]、郑济高铁黄河公铁两用大桥^[10]等。

传统节点连接方式为螺栓连接、铆接或焊接,节点刚域的模拟方法研究较多。Zaharia等^[11]基于试验提出考虑螺栓直径和相交腹杆数量的节点转动刚度计算方法;刘海锋等^[12]采用4种方法计算了加劲板和连接板形成的主材节点刚域对输电塔受力的影响并对比试验结果,结果表明将考虑节点刚域影响的主材视为若干段不同截面梁单元组合的方案最佳。

近年来,整体节点应用研究日趋增多。盛兴旺等^[13]针对榕江特大桥分别建立常规梁单元模型、多尺度模型和刚臂梁单元模型研究节点刚度对结构力学效应的影响,结果表明考虑节点刚域的计算结果偏于安全;宋胜录^[14]针对金山铁路黄浦江特大桥分别建立考虑刚域与不考虑刚域效应的计算模型,与实测数据对比后认为考虑节点刚域的计算结果更接近实际;高强等^[15]针对蒙华铁路跨平汝高速大桥分别建立了节点铰接、节点刚接和考虑节点刚度影响的带刚臂空间梁单元3种有限元模型,对比分析不同情况下结构的变形、内力和组合应力,认为应充分考虑整体节点刚度对钢桁梁桥受力性能的影响;朱志辉等^[16]针对节点刚域对钢-混组合桁架梁桥行车动力响应分析的影响进行研究,认为节点刚域对桥梁动力特性有显著影响。

既有研究^[11-16]对考虑钢桁梁节点刚域影响的必要性已有共识,但对节点刚域的精确模拟仍有欠缺。一方面,由于全桥节点板的子结构模型^[17-22]往往过于复杂,故通常采用带刚臂的梁单元模拟节点刚性区,但鲜有对钢节点刚域长度取值的研究;另一方面,已有研究多基于成桥状态,鲜有针对施工过程中不利工况(尤其是悬拼施工)的影响以及误差累积效应的研究。再者,目前仅《高层建筑混凝土结构技术规

程》(JGJ 3—2010)^[23]中第5.3.4条规定了混凝土框架节点刚域长度的近似计算公式,桥梁相关设计规范均未涉及刚域概念。因此,有必要进一步研究开展钢桁梁整体节点刚域取值,使计算更加接近实际。

本文以中山西环联石湾大桥为工程背景,选取5个连续的标准节段建立刚臂梁单元模型和带节点板子结构的多尺度模型,在同一边界与荷载条件下,以多尺度模型的主桁挠度为目标优化刚臂梁单元模型的节点刚域长度,结合各工况实测数据对比检验刚臂梁单元模型的优化效果,研究结果可为整体节点钢桁梁桥的模拟计算提供参考。

1 工程概况

中山西环联石湾大桥采用独塔两跨钢桁梁斜拉桥结构,桥跨布置为 2×206 m。索塔采用门形混凝土塔,主梁为双桁双层框架断面,采用Warren式桁架,主桁中心高度为10.55 m,中心距为35.4 m,各杆件均为闭口箱形断面且均为焊接构件。

桥面板采用正交异性钢桥面板,钢桥面板由桥面板、U肋、板肋、横隔板组成,标准节段横隔板间距为3 m,近塔段为2 m。

全桥分为Z16~Z0共33个节段,顺桥向关于桥塔中线对称,主塔处0[#]段(Z16)长21 m,1[#]段(Z15)长13 m,标准节段(Z14~Z1)长12 m,过渡墩顶梁段(Z0)长14.55 m。桥型布置、标准断面及梁段划分如图1~3所示。

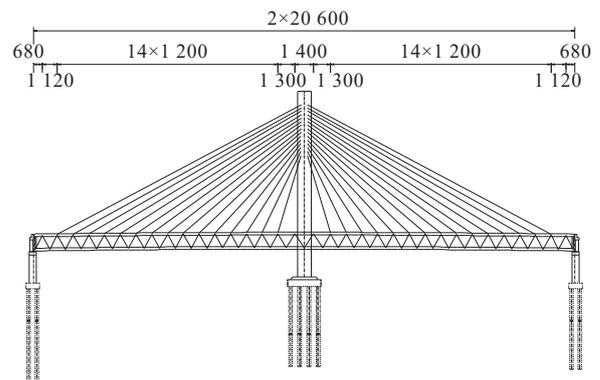


图1 桥型布置(单位:cm)

Figure 1 Bridge type arrangement(unit:cm)

范围内的梁单元设置成刚臂,桥面板采用壳单元 Shell 181 模拟。

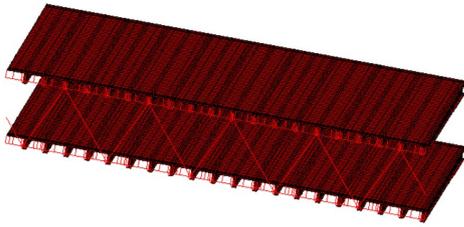


图6 Z7~Z11 节段刚臂模型

Figure 6 Z7~Z11 section model with rigid arm

多尺度模型如图7、8所示,其与刚臂模型的区别在于:根据节点的实际构造,采用壳单元 Shell 181 建立整体节点子结构并替代相应节点区域内的主桁架梁单元。其中,圆角等构造细节在确保整体精度的前提下做了适当近似,且局部模型中均为标准节段,上、下弦节点构造相同,便于节点子结构进行批量复制建模,与建立全桥节点子模型相比,大大减少了工作量,降低了建模复杂性。在桁梁多尺度模型中,将节点子模型的弦杆、腹杆切口截面各节点与对应的梁单元节点进行自由度耦合来实现与主桁梁单元的连接。

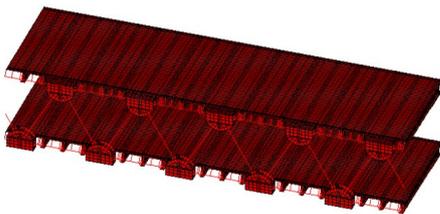


图7 Z7~Z11 节段多尺度模型

Figure 7 Multi-scale model for Z7~Z11 sections

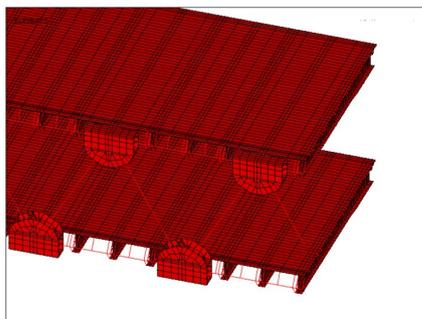


图8 多尺度模型局部示意图

Figure 8 Local multi-scale model

2.3 节点刚域长度的优化

结构变形能够准确反映结构的整体刚度^[14],为优化节点刚域长度,对上述两种模型施加相同边界与荷载条件:主桁首尾施加固定约束,桥面中心线处

施加对称约束,在桥面施加均布荷载。为保证结果准确,根据圣维南原理,取远离边界的上层节点 C7~C9 之间(Z7~Z11 节段模型中间部分)9 处带横隔板截面(Y1~Y9)进行研究。

4 种模型的桥面中心挠度如图 9 所示,其值为桥面中线与对应弦杆处的挠度差值。无刚域的梁单元模型与多尺度模型最接近,设置刚域会增大梁单元模型与多尺度模型桥面挠度的误差,但桥面挠度对 α_x 和 α_z 的敏感性差异较大。当 $\alpha_x = 1$ 时,与无刚域模型的桥面挠度相对差值小于 5%,而 $\alpha_z = 1$ 时,与无刚域模型的桥面挠度相对差值处于 18.7%~27.6%,误差较大。为了兼顾桥面挠度模拟的准确性,故取 $\alpha_z = 0$ 。

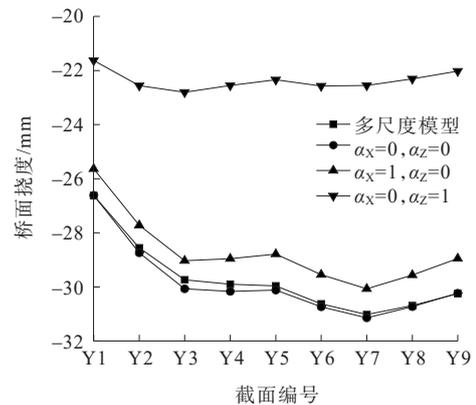


图9 桥面中心挠度对比

Figure 9 Comparison of deflection of deck center

令 $\alpha_x = 1$,逐步减小 α_x 值进行多次计算,得到 Y1~Y9 处主桁关于腹杆刚域长度的挠度变化曲线,部分关键截面的挠度变化曲线如图 10 所示,挠度变化值为负代表向下挠度增大。

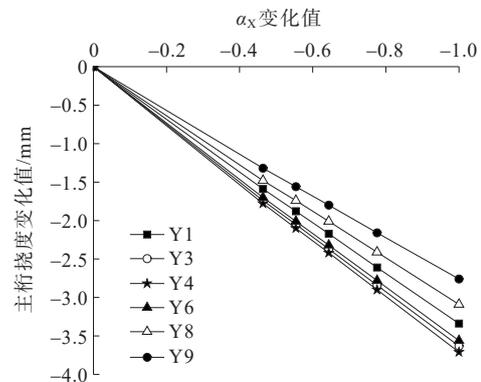


图10 α_x 变化值与主桁挠度变化值关系

Figure10 Relationship between α_x variation and main truss deflection variation

刚域长度的优化过程为:先计算多尺度模型的主桁架竖向位移(U_{y0})并以此作为目标挠度,再调整刚域长度,使刚臂梁单元模型主桁架挠度(U_{y1})接近目标挠度(U_{y0}),最终求得使 U_{y1} 最接近 U_{y0} 的 α_x 值。如图10所示,主桁架各点挠度变化值与 α_x 变化值均近

似线性关系,故采用线性内插方式求得联石湾大桥最优的 α_x 值为0.359。

$\alpha_{x1} = 1$ 、 $\alpha_{x2} = 0.359$ 、 $\alpha_{x3} = 0$ 对应的3种刚臂模型与多尺度模型主桁架挠度计算结果如表1、2所示。

表1 局部模型上弦主桁架挠度对比

Table 1 Comparison of deflection of upper chord of main truss of local model

截面编号	到塔距 离/m	上弦主桁架挠度/mm				(②/①)/	(③/①)/	(④/①)/
		多尺度①	α_{x1} ②	α_{x2} ③	α_{x3} ④	%	%	%
Y1	92	-5.6	-4.4	-5.4	-6.0	78.6	96.4	107.1
Y2	95	-7.7	-6.2	-7.6	-8.4	80.5	98.7	109.1
Y3	98	-9.8	-7.9	-9.7	-10.6	80.6	99.0	108.2
Y4	101	-11.3	-9.1	-11.1	-12.2	80.5	98.2	108.0
Y5	104	-12.2	-9.8	-11.9	-13.1	80.3	97.5	107.4
Y6	107	-13.2	-10.7	-13.0	-14.2	81.1	98.5	107.6
Y7	110	-13.9	-11.4	-13.7	-15.0	82.0	98.6	108.0
Y8	113	-14.1	-11.4	-13.9	-15.1	80.9	98.6	107.1
Y9	116	-13.8	-11.1	-13.5	-14.8	80.4	97.8	107.2

表2 局部模型下弦主桁架挠度对比

Table 2 Comparison of deflection of lower chord of main truss of local model

截面编号	到塔距 离/m	下弦主桁架挠度/mm				(②/①)/	(③/①)/	(④/①)/
		多尺度①	α_{x1} ②	α_{x2} ③	α_{x3} ④	%	%	%
Y1	92	-12.6	-10.5	-12.6	-13.8	83.3	100.0	109.5
Y2	95	-13.4	-11.0	-13.3	-14.5	82.1	99.3	108.2
Y3	98	-13.7	-11.0	-13.4	-14.6	80.3	97.8	106.6
Y4	101	-14.2	-11.6	-14.1	-15.4	81.7	99.3	108.5
Y5	104	-14.2	-11.8	-14.2	-15.5	83.1	100.0	109.2
Y6	107	-13.5	-11.1	-13.5	-14.7	82.2	100.0	108.9
Y7	110	-12.5	-10.1	-12.2	-13.4	80.8	97.6	107.2
Y8	113	-11.7	-9.6	-11.6	-12.7	82.1	99.1	108.5
Y9	116	-10.4	-8.6	-10.4	-11.4	82.7	100.0	109.6

表中①为对应多尺度模型(模型①)的主桁架挠度;②为对应把整个节点区域视为刚域的刚臂模型(模型②)的主桁架挠度;③为对应优化后的刚臂模型(模型③)的主桁架挠度;④为对应不考虑刚域的常规梁单元模型(模型④)的主桁架挠度。

由表1、2可知:刚臂长度不同的3种模型主桁架挠度与多尺度模型计算结果的差值百分比基本相同,各关键截面计算值变化规律一致。若在整个节点区域内腹杆均设置为刚臂,模型②主桁架挠度结果低于多尺度模型18.0%~21.4%,过高估计了节点刚度;

模型④主桁架挠度结果高于多尺度模型7.1%~9.1%,低估了节点刚度。将 α_x 取值调整为0.359后,主桁架挠度与多尺度模型结果差距在2.7%以内,两者结果差距已大幅减小,说明刚臂长度 $L_{GX} = 0.359L_X$ 时可更好地模拟桥梁实际刚度情况。

3 节点刚域长度对结构挠度的影响

3.1 成桥状态挠度分析

利用结构对称性建立如图11所示的1/4全桥模型,加入壳单元节点的多尺度模型如图12所示。将

α_{X1} 、 α_{X2} 、 α_{X3} 分别代入 1/4 全桥模型中计算成桥状态下主桁挠度,对应刚臂模型分别记作模型 A、模型 B 与模型 C,对比结果如图 13 所示。

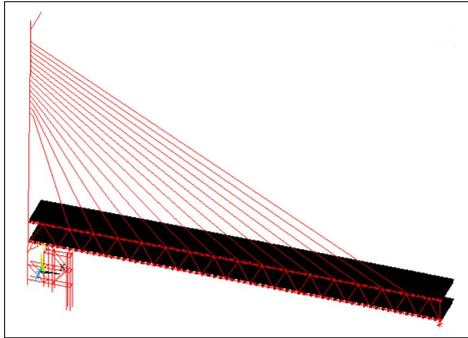


图 11 1/4全桥模型

Figure 11 Quarter model of whole bridge

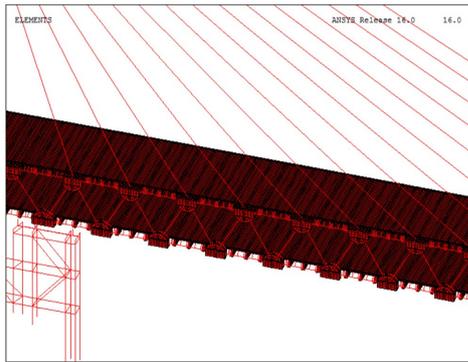


图 12 1/4全桥多尺度模型

Figure 12 Quarter multi-scale model of whole bridge

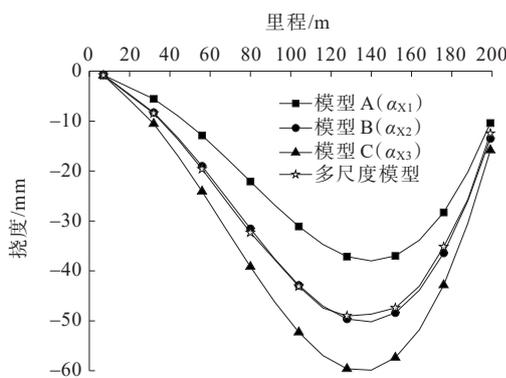


图 13 成桥状态主桁上弦挠度对比

Figure 13 Comparison of deflection of upper chord of main truss in completed state

成桥状态下模型 A、B、C 及多尺度模型的最大挠度分别为 37.3 mm、49.6 mm、59.4 mm、49.1 mm,模型 B 与多尺度模型挠度结果差距在 5% 以内,模型 B 与模型 A 最大挠度相对差值 24.8%,模型 B 与模型 C 最

大挠度相对差值 19.8%,但其绝对差值都在 13 mm 以下,总体上看相差不大,对模型差异的体现不够直观。

3.2 施工过程挠度分析

为了进一步验证刚臂梁单元模型的优化效果,对 3 种模型进行施工全过程计算,一个标准节段施工步考虑如下:吊机前移至 Z(N)段→起吊 Z(N-1)段主桁定位→Z(N-1)段悬拼完成→张拉 Z(N-1)段斜拉索,主桁吊装定位如图 14 所示。

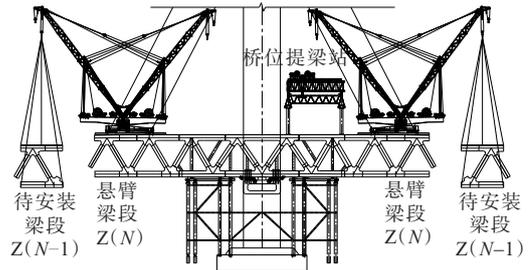


图 14 主桁吊装定位示意图

Figure 14 Hoisting and positioning of main truss

实际测量仅在上桥面进行,为了更加直观地体现不同模型间的差异,仅选择以下能使结构产生较大变形的工况与实测值进行对比。工况 1:Z10 悬拼完成;工况 2:Z7 悬拼完成;工况 3:Z1 悬拼完成。

实测挠度为 4 个对称测点数据的平均值,各工况理论与实测结果如表 3~5 与图 15~17 所示。

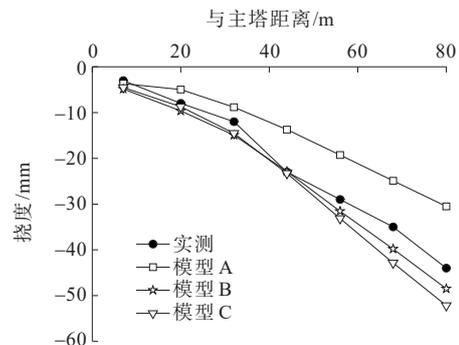


图 15 工况 1 主桁挠度对比

Figure 15 Deflection comparison of main truss under condition 1

工况 1 为悬拼施工早期阶段,由图 13 结合表 3 可知:节点刚臂长度不同的 3 种模型挠度计算结果以及实测挠度的绝对差值不大,施工定位误差与测量误差对结果有较大影响,模型 B、C 的最大挠度与实测结果很相近,但刚度最大的模型 A 的最大挠度结果仅为实测值的 69.3%,差值绝对值也达到 14 mm。

由图 16、17 结合表 4、5 可知:随着悬拼施工的进

表3 工况1上弦杆节点挠度对比

Table 3 Comparison of joint deflection of upper chord under condition 1

测点	到主塔 距离/m	实测值/ mm	计算结果/mm			(模型A/实 测)/%	(模型B/实 测)/%	(模型C/实 测)/%
			模型A	模型B	模型C			
C1	7	-3	-3.7	-4.9	-4.5	122.6	161.8	151.3
C2	20	-8	-5.0	-9.6	-8.7	62.0	120.5	108.9
C3	32	-12	-8.8	-14.9	-14.5	73.6	124.6	121.2
C4	44	-23	-13.7	-22.9	-23.3	59.6	99.6	101.3
C5	56	-29	-19.3	-31.6	-33.1	66.4	108.9	114.2
C6	68	-35	-24.9	-39.8	-42.8	71.2	113.7	122.4
C7	80	-44	-30.5	-48.5	-52.2	69.3	110.2	118.5

表4 工况2上弦杆节点挠度对比

Table 4 Comparison of joint deflection of upper chord under condition 2

测点	到主塔 距离/m	实测值/ mm	计算结果/mm			(模型A/实 测)/%	(模型B/实 测)/%	(模型C/实 测)/%
			模型A	模型B	模型C			
C1	7	-4	-3.3	-4.4	-4.2	82.8	110.3	104.6
C2	20	-7	-4.0	-8.7	-8.1	57.1	124.7	115.3
C3	32	-15	-6.9	-13.4	-13.5	46.0	89.4	90.3
C4	44	-23	-10.6	-20.8	-22.0	46.0	90.3	95.9
C5	56	-30	-15.1	-29.3	-32.1	50.2	97.6	107.0
C6	68	-39	-20.3	-38.7	-43.2	52.1	99.3	110.8
C7	80	-50	-26.4	-49.2	-55.2	52.7	98.4	110.4
C8	92	-59	-33.0	-60.3	-67.8	56.0	102.2	114.9
C9	104	-71	-40.0	-71.1	-80.4	56.3	100.2	113.2
C10	116	-78	-47.1	-83.0	-92.9	60.4	106.4	119.1

表5 工况3上弦杆节点挠度对比

Table 5 Comparison of joint deflection of upper chord under condition 3

测点	到主塔 距离/m	实测值/ mm	计算结果/mm			(模型A/实 测)/%	(模型B/实 测)/%	(模型C/实 测)/%
			模型A	模型B	模型C			
C1	7	-4	-3.1	-4.0	-3.8	77.6	100.0	95.5
C2	20	-8	-3.0	-7.6	-7.3	37.0	94.8	90.9
C3	32	-13	-4.2	-10.9	-11.9	32.2	84.1	91.6
C4	44	-17	-5.4	-16.5	-19.3	31.6	97.2	113.5
C5	56	-21	-6.6	-22.9	-28.1	31.3	109.2	133.9
C6	68	-29	-7.9	-30.0	-37.9	27.2	103.5	130.8
C7	80	-35	-9.3	-37.9	-48.7	26.6	108.3	139.2
C8	92	-50	-11.0	-46.5	-60.4	22.0	93.0	120.8
C9	104	-56	-13.1	-56.0	-73.0	23.4	100.0	130.4
C10	116	-63	-15.6	-66.4	-86.6	24.8	105.4	137.5
C11	128	-75	-18.7	-77.7	-101.2	24.9	103.5	134.9
C12	140	-92	-22.3	-89.9	-116.7	24.2	97.7	126.8
C13	152	-100	-26.3	-102.9	-133.1	26.3	102.9	133.1
C14	164	-110	-30.5	-116.6	-150.2	27.7	106.0	136.5
C15	176	-131	-34.5	-129.7	-167.3	26.3	99.0	127.7
C16	188	-149	-39.7	-144.6	-184.9	26.6	97.1	124.1

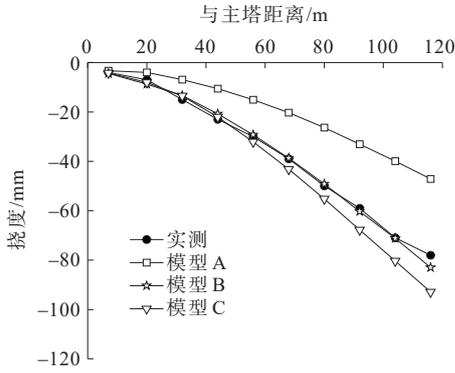


图 16 工况 2 主桁挠度对比

Figure 16 Deflection comparison of main truss under condition 2

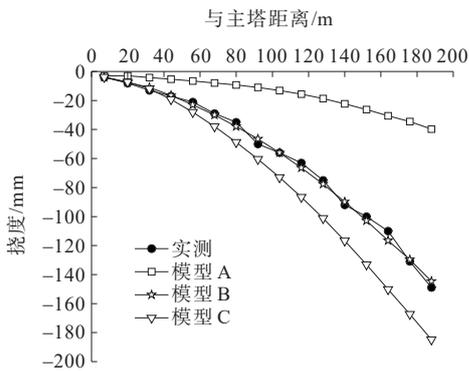


图 17 工况 3 主桁挠度对比

Figure 17 Deflection comparison of main truss under condition 3

行,由节点刚度导致的挠度误差迅速累积,直到工况 3 中全桥达到最大悬臂状态,模型 A 中最大挠度仅为实测值的 26.6%,相差达到 109 mm,说明模型 A 中将整个节点区域内的腹杆单元设置为刚臂严重高估了节点刚度。

进一步分析工况 3 上、下层桥面挠度如图 18、19

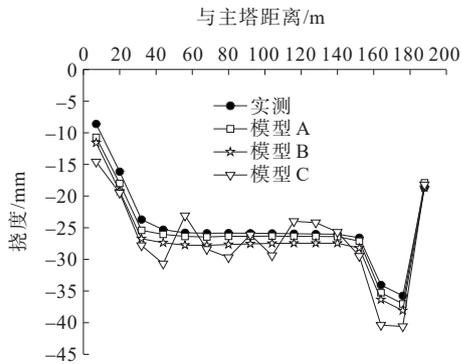


图 18 工况 3 上层桥面中线挠度对比

Figure 18 Center line deflection comparison of upper deck under condition 3

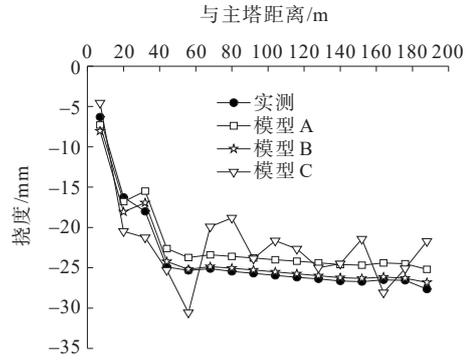


图 19 工况 3 下层桥面中线挠度对比

Figure 19 Center line deflection comparison of lower deck under condition 3

所示。不同的腹杆刚域长度对桥面挠度结果影响较小,3种模型之间相对差值基本上小于 5%,绝对差值也在 1 cm 以内。施工过程中,桥面挠度实测值可能受到温度、不均匀的临时荷载及测量误差影响,与理论值有一定差距,但其总体趋势与 3 种理论值相近。

对于已优化刚域长度的模型 B,其主桁挠度在以上所列 3 个工况中均保持了与实测数据的精准拟合,各节点理论挠度与实测值差距均小于 10 mm,说明采用上述方法优化刚域长度对刚臂模型的计算精度有较大提高。对于忽略节点刚域的模型 C,其理论结果在代表悬拼施工前中期的工况 1、2 中与实测值的最大误差绝对值在 15 mm 以内,误差远小于模型 A,直到工况 3 中的最大悬臂状态才出现了 30 mm 以上的较大误差。

综上,理论与实测数据表明:不考虑节点刚域或将整个节点区域视作刚域都有可能导致在施工过程计算中出现过大的误差累积现象,导致理论结果远偏离实际,对于用刚臂模拟节点刚域的钢桁梁桥模型,优化其刚臂长度使其尽可能接近节点实际刚度很有必要,采用本文优化方法建立的模型与实测值吻合较好,有效提高了本桥理论计算的精确度。

4 结论

(1) 针对中国桥梁相关规范暂未涉及焊接整体节点刚域计算的现状,提出以简单多尺度局部模型为参考计算节点刚域长度的方法,用以提高带刚臂梁单元模型模拟整体节点刚域的精度。

(2) 采用带刚臂梁单元模拟节点刚域,若将整个节点区域视作刚域,可能导致在施工步计算中出现

过大的误差累积现象。对联石湾大桥的计算结果与实测数据表明:将整个节点区域视作刚域进行建模在最大悬臂工况下的最大挠度与实测值的误差达到73.4%,而同一工况下忽略刚域影响的误差仅有24.1%,说明刚域长度对全桥挠度的影响不可忽略,若取值不准确甚至会起到增大误差的反效果。

(3) 钢桁梁节点构造形式众多,若同一钢桁梁结构中存在大量构造不同的节点(例如变桁高钢桁梁结构),此时建立多尺度模型将带来巨大的工作量,故适用性更广的节点刚域优化方法还有待于进一步研究。

参考文献:

References:

- [1] 李健,赵鹏磊. 马鹿塘特大桥主桥桥型方案研究和比选[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 157-160.
LI Jian, ZHAO Penglei. Study and comparison of main bridge type schemes of Malutang Super Major Bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 157-160.
- [2] 朱红明,程海潜,李清,等. 大节段钢桁梁悬索桥主梁架设的窗口铰接法研究[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 120-123.
ZHU Hongming, CHENG Haiqian, LI Qing, et al. Window hinged method for erecting main girder of long-span steel truss suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 120-123.
- [3] 荣钊,王保群,荣锐,等. 大跨度宽幅钢桁梁桥散拼施工控制[J]. 山东交通学院学报, 2019, 27(2): 44-52.
RONG Zhao, WANG Baoqun, RONG Rui, et al. Assembling construction control of large-span and broad-width steel truss bridge[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2019, 27(2): 44-52.
- [4] 杨书生,崔凤坤,王建圣,等. 基于可靠度反演理论的大悬臂钢桁梁横移施工抗倾覆稳定设计[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 87-91.
YANG Shusheng, CUI Fengkun, WANG Jiansheng, et al. Research on design method of anti-overturning stability of large cantilever steel truss beam traverse construction based on reliability inversion theory[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 87-91.
- [5] 邵梦龙,郭日强,唐绪. 降低钢桁梁悬索桥主桁疲劳应力幅的结构体系及其可行性研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 123-126.
SHAO Menglong, GUO Riqiang, TANG Xu. Study on structural system and feasibility for reducing fatigue stress amplitude of main truss in steel truss suspension bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 123-126.
- [6] 沈大才,王东辉. 平潭海峡公铁大桥钢桁梁斜拉桥整节段悬臂拼装杆件对接顺序研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(3): 131-137.
SHEN Dacai, WANG Donghui. Study of members butt joint sequence in integral steel truss segment cantilever assembly of Pingtan Straits Rail-Cum-Road Bridge[J]. Bridge Construction, 2021, 51(3): 131-137.
- [7] 邬宗平. 渝黔铁路新白沙沱长江特大桥钢桁梁架设技术[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 114-118.
WU Zongping. Erection technique for steel truss girder of new baishatuo Changjiang River Bridge on Chongqing-Guiyang Railway[J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 114-118.
- [8] 刘康,邢惟东,王辉,等. 重庆红岩村嘉陵江大桥墩顶钢桁梁架设技术[J]. 世界桥梁, 2021, 49(5): 27-33.
LIU Kang, XING Weidong, WANG Hui, et al. Pier-top steel truss girder erection technique for Jialingjiang River Bridge in Hongyan Village, Chongqing[J]. World Bridges, 2021, 49(5): 27-33.
- [9] 刘琴,杨钻,王雷. 牛田洋大桥主桥钢桁梁设计[J]. 桥梁建设, 2023, 53(2): 98-104.
LIU Qin, YANG Zuan, WANG Lei. Design of steel truss girder of main bridge of Niutianyang Bridge[J]. Bridge Construction, 2023, 53(2): 98-104.
- [10] 王海彬. 郑济高铁黄河公铁两用大桥连续钢桁梁架设技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(5): 8-13.
WANG Haibin. Erection techniques for continuous steel truss girder of a Huanghe River Rail-cum-Road Bridge of Zhengzhou-Jinan High-Speed Railway[J]. Bridge Construction, 2022, 52(5): 8-13.
- [11] ZAHARIA R, DUBINA D. Stiffness of joints in bolted connected cold-formed steel trusses[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(3): 240-249.
- [12] 刘海锋,杨靖波,韩军科,等. 考虑主材节点刚域影响的钢管输电塔变截面梁单元有限元模型[J]. 工程力学, 2015, 32(6): 162-170.
LIU Haifeng, YANG Jingbo, HAN Junke, et al. Finite element model of varied-section beam element for tubular transmission tower considering rigid zones of main members[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(6): 162-170.
- [13] 盛兴旺,郑纬奇,戴劲. 考虑整体节点刚域模拟影响的钢

- 桁梁力学效应分析[J].桥梁建设,2016,46(6):78-82.
- SHENG Xingwang, ZHENG Weiqi, DAI Jin. Analysis of mechanical effect of steel truss girder considering influences of rigid zone simulation of integral joints[J]. Bridge Construction,2016,46(6):78-82.
- [14] 宋胜录.节点刚域对钢桁架桥的施工控制计算影响分析[J].施工技术,2014,43(23):87-89.
- SONG Shenglu. Influence analysis of the nodal-rigid zone on construction control calculation of steel truss bridge[J]. Construction Technology,2014,43(23):87-89.
- [15] 高强,黄天立,陈龙,等.整体节点刚度对钢桁梁桥受力性能的影响[J].土木工程与管理学报,2019,36(5):144-149,156.
- GAO Qiang, HUANG Tianli, CHEN Long, et al. Influence of stiffness of integral joints on mechanical properties of steel truss girder bridges[J]. Journal of Civil Engineering and Management,2019,36(5):144-149,156.
- [16] 朱志辉,张鹏,赵婷婷,等.考虑节点刚域影响的钢-混组合桁架梁桥行车动力响应分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(5):19-28.
- ZHU Zhihui, ZHANG Peng, ZHAO Tingting, et al. Driving dynamic response analysis of a steel-concrete composite trussed girder bridge considering the effect of nodal rigid zone[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018,45(5):19-28.
- [17] 姜开明,刘杰,候振华,等.基于多尺度有限元法的独塔叠合梁斜拉桥关键梁段精细化分析[J].北方交通,2018(9):1-6,11.
- JIANG Kaiming, LIU Jie, HOU Zhenhua, et al. Refine analysis of the critical beam section of composite girder cable-stayed bridge with single tower based on the multi-scale finite element method[J]. Northern Communications, 2018(9):1-6,11.
- [18] 张志兴,邓长根,巩俊松.基于子模型法的钢拱桥关键梁段精细化分析[J].科学技术与工程,2021,21(20):8656-8662.
- ZHANG Zhixing, DENG Changgen, GONG Junsong. Refined analysis of the key beam segment of steel arch bridge based on sub-model method[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(20):8656-8662.
- [19] 李大涛,李燕,吕彭民.基于子模型法的钢锚箱结构强度分析[J].中外公路,2022,42(6):105-108.
- LI Datao, LI Yan, LYU Pengmin. Analysis on structural strength of anchor box based on sub-modeling[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):105-108.
- [20] 宋君超,周艳.正交异性钢桥面铺装有限元分析方法的比较[J].中外公路,2019,39(1):82-86.
- SONG Junchao, ZHOU Yan. Comparison on finite element methods of orthotropic steel bridge deck pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(1):82-86.
- [21] 刘宏达.简支钢桁梁桥面板及槽形梁架设结合施工技术[J].世界桥梁,2022,50(3):25-31.
- LIU Hongda. Techniques to install simply-supported steel truss girder and connect concrete deck slabs and trough girder with steel trusses[J]. World Bridges, 2022, 50(3): 25-31.
- [22] 欧阳石.中老铁路元江特大桥连续钢桁梁架设技术[J].公路,2023,68(8):94-102.
- OUYANG Shi. Erection technology of continuous steel truss girder of Yuanjiang bridge in China-Laos Railway[J]. Highway,2023,68(8):94-102.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2010[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2011.