

株洲清水塘大桥关键节点受力性能分析

刘大中

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 清水塘大桥为主跨408 m的三跨连续双层钢桁架拱桥, 桥梁边跨为开敞式桁架构造, 未布设横向联结系与平面联结系; 墩顶位置上弦节点既是全桥首道横联、平联的布设点位, 又是施工扣塔锚固构造, 为全桥受力控制关键节点。该节点内部构造复杂, 全桥整体有限元模型难以精准反映其细部受力状态, 因此需依托整体计算成果开展局部精细化实体建模。围绕关键节点精细化分析技术开展研究, 完成局部模型构建与有效性校验, 针对恒载、恒活载组合两类控制工况开展静力及稳定计算, 探明该关键节点的受力特征与应力分布规律, 可为节点结构优化设计与工程构造完善提供理论依据。

关键词: 清水塘大桥; 钢桁架拱桥; 关键节点; 局部模型; 精细分析

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0208-05

Analysis on Force Performance of Key Nodes in Zhuzhou Qingshuitang Bridge

LIU Dazhong

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The Qingshuitang Bridge is a three-span continuous double-deck steel truss arch bridge with a main span of 408 m. Its side span is an open truss structure without transverse connection systems or planar connection systems. The upper chord node at the top of the pier is not only the layout point of the first transverse and planar connections of the entire bridge, but also the anchoring structure for construction clamping pylon, which is a key node for the force control of the entire bridge. The internal structure of this node is complex. The overall finite element model of the entire bridge is difficult to accurately reflect its detailed force state. Accordingly, the local refined solid modeling should be carried out based on the overall computing results. The research is conducted on the refined analysis technology of key nodes, and the construction of local models and the verification of their validity are completed. The static and stability calculations are carried out for two types of control conditions such as constant load and constant live load combination to clarify the force characteristics and stress distribution laws of this key node, which can provide a theoretical basis for the optimal design of node structures and the improvement of engineering construction.

Keywords: Qingshuitang Bridge; steel truss arch bridge; key node; local model; refined analysis

0 引言

钢桁架拱桥凭借其受力高效、跨越能力突出、材料利用率高的显著优势, 被广泛应用于铁路、公路跨江跨海、越岭穿山等关键工程中^[1-2]。作为钢桁架拱桥的核心传力构件, 节点是连接主拱弦杆、腹杆、横联、平联的关键枢纽, 承担着各杆件轴力、剪力、弯矩的传递与分配任务, 其受力性能直接决定了桥梁结构的整体承载能力、刚度与耐久性, 是保障桥梁长期安全稳定运营的核心环节。钢桁架拱桥的节点构造

复杂, 需同时衔接多根不同方向、不同受力状态的杆件, 节点处的应力分布、变形特性及传力路径均呈现出显著的复杂性, 若设计或分析不当, 可能导致节点失效, 进而引发整个桥梁结构的安全隐患^[3]。

1 工程概况

株洲市清水塘大桥采用 $L=100\text{ m}+408\text{ m}+100\text{ m}$ 的双层钢桁架拱桥, 三跨连续结构, 墩顶设置支座, 见图1。上层桥面宽32 m, 车行道净宽24.5 m, 双向6车道^[4]; 下层布置慢行人非道, 吊杆区净宽10 m, 休闲区净宽12 m。

主桥拱肋采用钢桁拱, 主跨满布横联风撑; 主跨桥面采用双主梁式超高性能混凝土 (ultra high-

收稿日期: 2026-03-30

作者简介: 刘大中(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

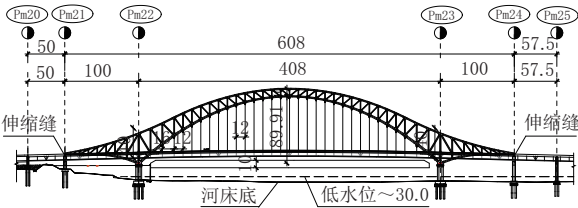


图1 清水塘大桥主桥立图(单位:m)

per fomnnance, UHPC) 轻型组合钢桥面,边跨采用双主梁+横梁的钢混凝土组合桥面,拱肋节段栓接连接,主梁节段栓焊结合连接。

2 主桥关键节点设计

2.1 主桁结构设计

全桥有两片主桁,横向间距 27.5 m,采用风撑连接。上弦拱轴线采用二次抛物线和圆曲线相结合,下弦拱轴线为二次抛物线,矢高 90 m,矢跨比 1/4.5。

主桁拱肋在中跨布置风撑,其中上弦风撑中跨满布布置,下弦风撑从跨中布置至第一根吊索处。拱肋上、下弦平纵联采用菱形桁式,杆件采用焊接 H 形截面,由于相邻节间存在夹角,平联节点板采用弯折方式过渡。每两个节间设置一副桁架式横联,位于上下平纵联米字形中点处,杆件采用焊接 H 形截面。拱脚处设置 K 撑,支承拱肋下弦杆,K 撑采用焊接箱型截面。主桁架总体布置见图 2。

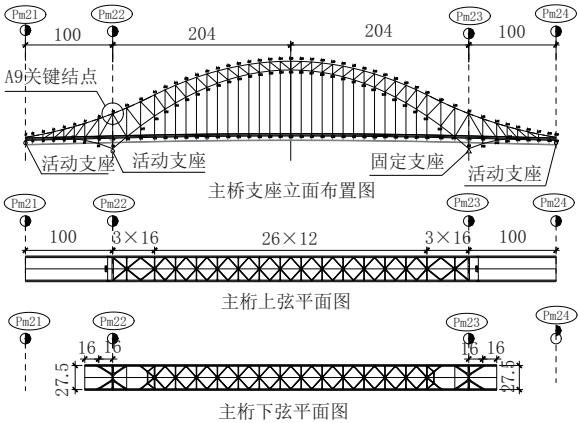


图2 主桁架总体布置图(单位:m)

主桁架上弦杆在边跨采用开敞式桁架,横桥向不设平联和横联,因此相比于常规钢桁架拱桥,主墩顶上弦杆处横联与弦杆节点受力更大更复杂^[5],该节点(A9节点)为受力关键节点。

2.2 关键节点结构设计

A9 节点是桁架拱边中跨分界点,其在平面内连接弦杆、竖腹杆、斜腹杆外,在平面外连接横联横杆、斜杆及平联斜杆;在施工期间,该节点顶部也是施工扣塔的基础锚固点,承受巨大的集中荷载,因此该节

点受力及其复杂。

主桁上下弦杆、平联、横联的关系见图 3,主要杆件的截面尺寸、钢板厚度和材料见表 1。

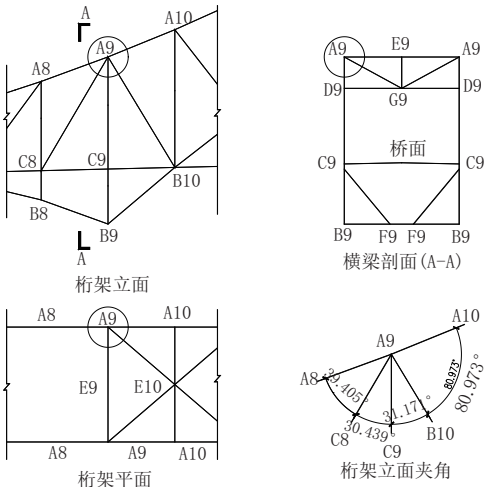


图3 A9节点空间关系示意图

表 1 A9 节点处主要连接杆件参数表

杆件编号	杆件材料	截面类型	截面宽度	截面高度	顶板厚度	底板厚度	腹板厚度
A8-A9	Q370qD	箱型	1 800	1 600	24	24	24
A9-A10	Q370qD	箱型	1 800	1 600	24	24	24
A9-C8	Q370qD	I 型	1 800	1 520	44	44	44
A9-B10	Q370qD	I 型	1 800	1 520	44	44	44
A9-C9	Q370qD	箱型	1 800	1 600	32	32	32
A9-A9	Q345qD	箱型	1 600	1 600	20	20	20
A9-C9	Q345qD	I 型	800	1 600	24	24	20
A9-E10	Q345qD	箱型	800	800	20	20	20

节点板厚度为 48 mm,由于节点板除连接桁架平面内的弦杆、腹杆外,尚需连接平联、横联节点板,承受面外荷载,故节点板采用 Z 向钢 Q420qDZ25,见图 4。

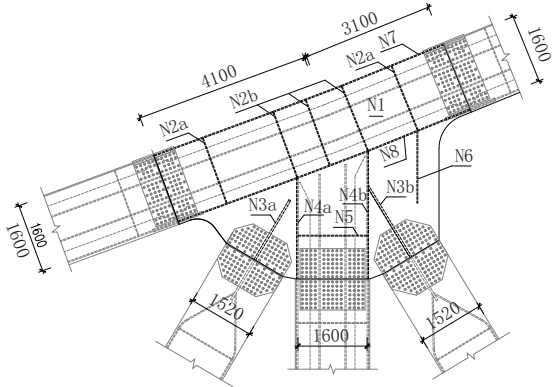


图4 节点板主要构造示意图(单位:mm)

节点板内部设置横隔板和加劲,其主要板件的参数见表 2。

3 关键节点受力性能分析

3.1 节点受力分析方法

对于桁架节点,除连接的各个杆件外,还有整体

表2 A9节点处主要连接杆件参数表

板件编号	板件名称	板件材料	板件厚度
N1	节点板	Q420qDZ25	48
N2a	隔板	Q370qD	20
N2b	隔板	Q370qD	30
N3a	腹杆接头	Q370qD	44
N3b	腹杆接头	Q420qD	44
N4a/N4b	腹杆接头	Q370qD	32
N5	隔板	Q370qD	20
N6	节点板加劲	Q370qD	20
N7	弦杆顶板	Q370qD	24
N8	弦杆底板	Q370qD	24

节点板、横隔板、加劲肋等,局部刚度大,杆系整体模型不能反映其复杂受力状态,需要建立节点板相关范围内的局部模型^[6],利用板单元精确分析节点受力结果^[7-8]。

节点模型采用大型通用有限元程序 ANSYS 建立(见图 5),所有钢板采用空间板单元模拟,将总体模型中提取的力的边界和位移边界施加于板壳模型上,以反映结构真实受力情况^[14-15]。

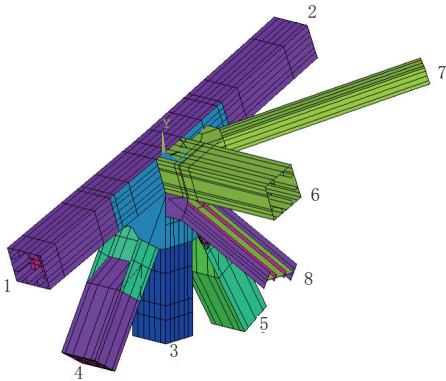


图5 A9节点计算模型

注:主要杆件位置编号见图5,其中1为边跨弦杆(A8-A9),2为中跨弦杆(A9-A10),3为竖腹杆(A9-C9),4为边跨斜腹杆(A9-C8),5为中跨斜腹杆(A9-B10),6为横联横梁(A9-A9),7为平联斜杆(A9-E10),8为横联斜杆(A9-G9)。

3.2 计算荷载

永久荷载包括钢结构自重、结构压重等一期恒载,铺装、栏杆等二期恒载。节点计算活载为城-A级车道荷载,考虑多车道折减系数和汽车冲击系数。

A9节点计算所采用的杆件内力,由整体分析模型提供,内力采用各个杆件同时发生的内力。工况1:恒载,内力见表3;工况2:恒载+活载,内力见表4。

3.3 边界条件

模型边界条件分为两类,即力边界和位移边界。如图5所示,在A9节点的节段分析模型中,A9C9竖腹杆采用位移边界,弦杆、斜腹杆及联结系杆件均采用力边界。杆件端部采用梁单元模拟,梁单元与板

表3 工况1:恒载杆件内力

位置	N/kN	F_y/kN	f_z/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	8 838	232	12	-495	-98	-771
2	-3 287	-199	-404	5	-497	-325
3	-2 5261	-263	-208	53	-1 091	-972
4	860	117	-31	-141	-59	864
5	21 506	-107	-177	34	-434	-282
6	-415	-23	-44	55	180	-324
7	-311	-19	8	-25	2	64
8	133	-1	-4	0	81	44

表4 工况2:恒载+汽车活载杆件内力

位置	N/kN	F_y/kN	f_z/kN	$M_x/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_z/(\text{kN}\cdot\text{m})$
1	10 489	263	1 100	-556	-136	-854
2	-3 373	-218	-446	9	-581	-384
3	-27 807	-310	-240	71	-1 261	-1 096
4	518	134	-34	-171	-99	995
5	24 127	-129	-191	46	-487	-380
6	-430	-25	-48	63	179	-369
7	-323	-20	9	-28	6	59
8	109	-1	-4	0	88	44

单元通过刚臂连接。内力由总体梁单元模型中提取,再施加于局部模型中的梁单元上^[9-10]。

中跨斜腹杆受拉,且轴力较大,为更精确反应节点板应力状态,模拟了中跨斜腹杆的螺栓连接。螺栓拼接板与母板均采用 shell63 单元模拟,不考虑拼接板的滑移,螺栓与母板的连接用刚臂模拟,即耦合两者自由度。

3.4 模型验证

为验证模型的正确性,验算恒载工况下,在整体模型中选取相同的杆件,与节点模型的计算结果进行对比。节点模型的力的边界为整体模型中杆件对应位置的恒载内力。

成桥恒载工况下,A9C9节点轴力 25 261 kN,ANSYS 模型中约束反力为 25 121 kN,整体模型与 ANSYS 模型内力吻合。

由表5计算结果可知,ANSYS模型各杆件正应力与 MIDAS 模型之间的误差在 5% 以内,可以认为局部模型与整体模型计算结果吻合。

4 关键节点受力性能分析结果

4.1 主桁节点板强度分析

由表1、表2可知,节点板连接的杆件中,竖腹杆3、中跨斜腹杆5、边跨上弦杆1的轴力比其余杆件

表 5 工况 1 恒载杆件应力对比表 单位:MPa				
位置/杆件	MIDAS 整体模型		ANSYS 局部模型	
	顶缘	底缘	顶缘	底缘
1/边跨弦杆	49.5	34.1	49.6	34.5
2/中跨弦杆	-8.0	-23.1	-8.2	-23.5
3/竖腹杆	-97.5	-77.6	-96.3	-75.3
4/边跨斜腹杆	10.0	7.1	10.0	6.9
5/中跨斜腹杆	100.9	97.4	101.0	97.5

大。如图 6 所示节点板的 Mises 应力云图,工况 1、工况 2 下节点板的应力分布规律基本一致,节点板应力分布跟其连接的杆件轴力正相关,与腹杆衔接的位置应力大,与中跨上弦杆衔接处应力小。节点板 Mises 应力见表 6。

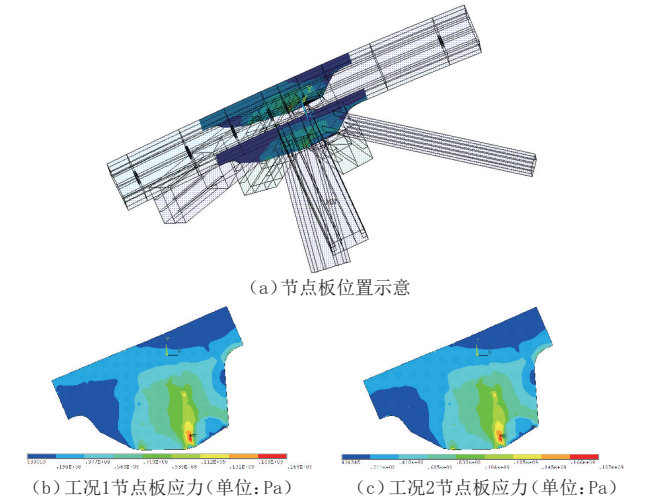


图 6 主桁节点板 Mises 应力云图

表 6 节点板 Mises 应力表 单位:MPa					
荷载	边跨弦杆侧	中跨弦杆侧	边跨斜腹杆	竖腹杆	中跨斜腹杆
工况 1	15.5	29.1	12.4	44.5	78.5
工况 2	24.2	31.4	14.2	48.9	80.7

由图 6 知,主桁节点板应力最大点位于竖腹杆与中跨斜腹杆栓接拼接板之间,工况 2 受力更为不利,其应力集中处最大 Mises 应力为 187 MPa。受竖腹杆和斜腹杆夹角限制,中跨斜腹杆的拼接板有切角,拼接板切角的位置节点板和拼接板总厚度有突变,导致应力集中。增加节点板厚度或面积、增大桁架间距均可改善此应力集中现象,可在总体设计中做设计比选,兼顾受力、外观和经济性选择合理方案。

4.2 横联横梁强度分析

由表 1、表 2 可知,横联横梁轴力相对较小,图 7 所示的平均应力也反映了这一点。结合表 7 可知,横梁的主跨侧腹板应力高于边跨侧,底板应力高于顶板侧,符合其构造特点,即有节点板衔接侧的应力高于另一侧。

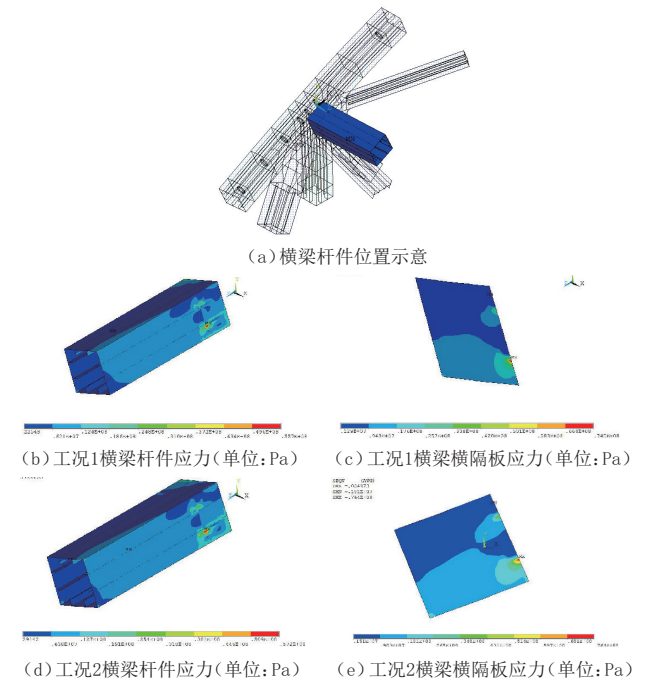


图 7 横联横梁 Mises 应力云图

表 7 横梁 Mises 应力表 单位:MPa				
荷载	横梁顶缘	横梁底缘	边跨横梁腹板	主跨侧横梁腹板
工况 1	10.2	17.4	6.7	14.5
工况 2	11.3	18.4	7.8	16.8

在横梁与横联、平联节点板相交处应力显著高于横梁平均应力,有明显的应力集中现象,横梁应力最大值位于横梁横隔板与平联节点板相交处,工况 2 下 Mises 应力最大值为 57.2 MPa。在横梁与平联、横梁节点板对应位置设置了横梁横隔板,有利于提高节点刚度,横隔板应力最大值位于横隔板与平联节点板相交处,横隔板与平联节点板在空间上十字相交,有明显的应力集中现象,工况 2 下 Mises 应力为 76.4 MPa。

4.3 平联节点强度分析

平联斜杆轴力总体很小,在静力工况下不控制设计。杆件端部应力分布见图 8,结合表 8,平联斜杆应力底缘大于顶缘,腹板也呈现从上到下逐渐增加,其应力分布与其端部承受压力和自重负弯矩相匹配。

平联节点板在与平联斜杆腹板的连接区域应力较大,最大值位于腹板接头板末端,最大应力值 89.0 MPa。节点板最大应力呈点状分布,在应力最大点周围应力迅速减小。这种典型的应力集中是由于平联斜杆腹板插入节点板中,在腹板拼接末端结构突变造成的。

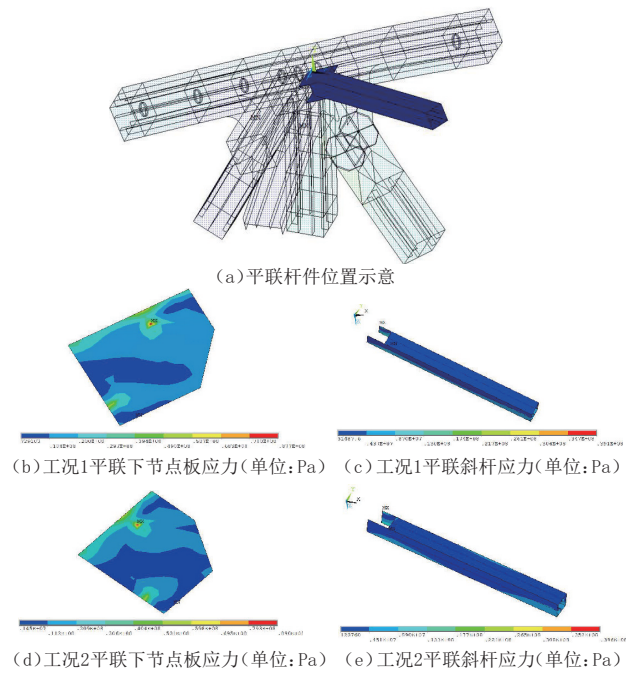


图 8 平联节点板及杆件 Mises 应力云图

表 8 平联斜杆 Mises 应力表 单位:MPa				
荷载	斜杆顶缘	斜杆底缘	斜杆腹板	节点板最大应力
工况 1	3.2	13.7	8.9	87.7
工况 2	8.3	13.1	9.0	89.0

4.4 横联节点强度分析

横联斜杆轴力总体很小,杆件端部应力分布见图 9,结合表 9,横联斜杆应力较低,横梁的主要作用在于增加横向刚度,提升结构的整体稳定性^[11-12]。

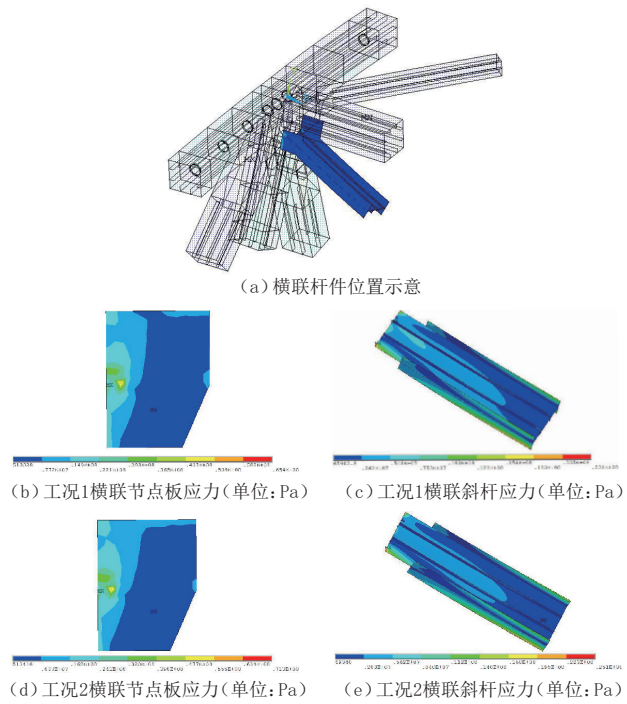


图 9 横联节点板及杆件 Mises 应力云图

横联节点板最大应力呈点状分布,在应力最大点周围应力迅速减小。这种典型的应力集中是由于

表 9 横联斜杆 Mises 应力表 单位:MPa				
荷载	斜杆顶缘	斜杆底缘	斜杆腹板	节点板最大应力
工况 1	4.15	9.61	5.22	65.4
工况 2	3.85	9.82	5.30	71.3

横联斜杆腹板插入节点板中,在腹板拼接末端结构突变造成的。

4.5 局部稳定分析^[13]

节点模型失稳模态见图 10。工况 1、2 下节点的失稳模态基本一致,中跨斜腹杆一阶失稳模态为斜腹杆变截面处横隔板局部失稳,由于斜腹杆从矩形截面过渡至工字型截面,横隔板受压,导致其隔板最先失稳。根据中跨斜腹杆横隔板失稳模态,说明增加斜腹杆变截面处增加横隔板板厚或者设置面外加劲板是合理的。竖腹杆一阶失稳模态为竖腹杆纵向加劲肋失稳,其稳定系数较大,竖腹杆整体稳定性较好。

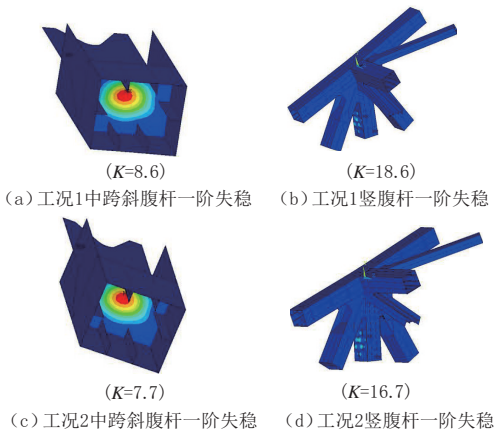


图 10 节点模型失稳模态(单位:Pa)

5 结 语

对于大跨径钢桁架拱桥,墩顶位置上弦节点是关键受力节点,全桥杆系整体模型已经不能满足局部分析的要求,应建立精细的板单元有限元模型,并提取整体模型中的杆件内力作为局部模型荷载,分析节点区域的主要杆件、节点板、横隔板、加劲肋的应力分布。

(1)节点精细模型可以作为整体模型的补充,可以反映主桁架节点范围内的应力分布,为大桥的节点板及其加劲的设计提供支撑。

(2)主桁平面内,节点板是弦杆、腹板内力传递和转换的关键,栓接拼接板端部应力集中现象突出,应加强其构造设计,有利于节点板受力均匀。

(3)平联、横梁可以提高结构整体稳定性,在静力工况下应力水平较低,但在横向联结系节点板处

(下转第 235 页)