

提篮桁架系杆拱人行桥拱脚结构局部应力分析

郑宇

(沈阳市市政工程设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 拱脚处是桁架拱桥的关键节点, 一般采用钢结构、钢混组合结构和混凝土结构等, 其受力状态复杂, 局部应力集中现象突出, 依靠平面杆件计算软件难以模拟实际复杂的应力状态, 通常采用有限元建模分析的方法进行计算。以一座提篮桁架系杆拱人行桥的拱脚钢结构作为研究焦点, 借助空间有限元分析软件 MIDAS Civil, 成功构建了拱脚结构的三维精细化模型。通过对该三维模型进行深入细致的力学分析, 得出了拱脚结构在受力状态下的具体数值。这些数值均符合相关设计规范的要求, 验证了结构设计的合理性。

关键词: 提篮桁架拱; 人行桥; 拱脚; 钢箱梁; 局部应力

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0136-04

Analysis on Local Stress of Arch Springing Structure of Basket Truss Bowstring Arch Footbridge

ZHENG Yu

(Shenyang Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110015, China)

Abstract: The arch springing is the key node of the truss arch bridge, and is usually made of steel structure, steel-concrete composite structure and concrete structure. Its stress state is complex, and the phenomenon of local stress concentration is prominent. It is difficult to simulate the actual complex stress state by using the plane member calculation software. Normally, the finite element modeling analysis method is used for calculation. Taking the steel structure of arch springing of a basket truss bowstring arch footbridge as the research focus, by the spatial finite element analysis software MIDAS Civil, the three-dimensional refined model of arch springing structure is successfully established. The in-depth and detailed mechanical analysis of the three-dimensional model is carried out to give the specific numerical values of the arch springing structure under the force-bearing state. These numerical values all meet the requirements of relevant design codes, and verify the rationality of the structural design.

Keywords: basket truss arch; footbridge; arch springing; steel box girder; local stress

0 引言

桥梁在城市规划中扮演着至关重要的角色, 它们不仅是连接空间的通道, 更是塑造城市独特魅力与文化空间、彰显城市文化底蕴的重要元素。桥梁的建设对于城市景观的美化具有深远的意义, 它们常常化身为城市的标志性符号, 吸引着游人驻足观赏, 成为热门的休闲与观光目的地。其中, 提篮桁架系杆拱桥以其别具一格的造型设计, 赢得了广泛的青睐与赞誉, 在城市桥梁建设的舞台上占据了一席之地, 为城市增添了一道亮丽的风景线。

提篮桁架系杆拱桥的拱脚结构, 作为拱圈与主

梁间关键的受力连接部位, 承载着来自拱肋、系梁的内力, 同时还需要应对巨大的支座反力以及系杆锚固产生的局部压力。鉴于拱脚节点处的结构复杂性和受力的多重性, 传统的杆系理论难以精确解析其受载后的应力分布, 因此采用有限元法对拱脚节点进行深入的局部受力分析显得尤为重要。这一方法能够揭示拱脚节点在三向受力条件下的空间应力分布规律及其大小, 为设计优化提供科学依据, 确保拱脚节点的设计既合理又可靠, 可有效指导节点构造的优化工作^[1-5]。

本文借助空间有限元软件 MIDAS Civil, 精心构建了拱脚结构的三维精细模型, 并深入开展了细部力学分析。

1 工程概况

某提篮桁架系杆拱桥位于沈阳市, 结构布置为

收稿日期: 2024-09-30

作者简介: 郑宇(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计及研究工作。

33 m+132 m+33 m=198 m。主跨 132 m 范围内设置 7.2 m 间距吊杆。桥宽 9 m,慢行道净宽 6 m。横向为两榀钢管桁架拱肋,拱肋内倾 6° ,主拱圈跨径 132 m,梁以上拱圈建筑高度 27 m。图 1 为桥梁建成图。



图 1 提篮桁架系杆拱桥建成图

钢管桁架采用有竖杆的三角形腹杆桁架,钢管桁架拱圈下弦杆计算矢高 26.4 m,跨径 132 m,矢跨比 1/5。下弦杆采用直径 0.8 m 钢管,标准厚度 30 mm,拱脚局部加厚至 36 mm。桁架拱竖腹杆及斜腹杆采用直径 0.4 m 钢管,拱脚采用直径 0.6 m 钢管和 0.5 m 钢管。

桁架拱圈钢管采用 Q355NE 钢材。主梁采用正交异性桥面板钢箱梁,梁高 2 m,宽 9 m。钢箱梁桥面板及其加劲肋、腹板、横隔板采用 Q355NE 钢板,其余采用 Q355ND 钢板。

钢箱梁横向布置为 1.5 m 宽系杆箱+3 m 慢行道中箱+3 m 慢行道中箱+1.5 m 宽系杆箱。

系杆箱宽 1.5 m,高 2 m。标准段顶板、腹板、底板厚度 20 mm。顶板、腹板、底板纵向加劲肋采用扁钢加劲形式,扁钢加劲高度 180 mm,钢板厚度 16 mm。拱脚段顶板、底板厚度 36 mm,腹板厚度 24 mm。顶板、腹板、底板纵向加劲肋采用扁钢加劲形式,扁钢加劲高度 240 mm,钢板厚度 20 mm。

横隔板标准间距为 2.4 m,在支点附近加密。标准横隔板板厚 10 mm,吊索下横隔板板厚 16 mm(吊点处横隔板局部加厚至 24 mm)。横隔板上设横向及纵向加劲肋,并预留人孔、泄水管孔、电缆孔。

2 模型建立

2.1 构造参数

文中仅对中间主跨 132 m 拱脚结构进行计算。拱脚结构均采用 Q355D 钢材,800 mm 直径主拱圈采用 36 mm 厚钢板,500 mm 和 600 mm 直径主拱圈采用 20 mm 厚钢板,仅在 800 mm 直径主拱圈底部周围布置加劲肋,加劲肋尺寸高度为 400 mm,厚度为 24 mm,顶部直角做倒角处理。支座处及拱圈下方横隔板均为 24 mm 厚,钢箱梁顶底板为 36 mm 厚,腹板

为 24 mm 厚,钢箱梁四周板肋尺寸为 240 mm×20 mm,横系梁顶底板均为 24 mm 厚,腹板为 18 mm 厚。

2.2 计算模型

利用 MIDAS Civil 软件,依据空间板单元模型进行计算分析。选取了距离支座两侧各 6 m 范围内的梁段作为建模的基础,同时在拱脚结构的两侧分别构建了相邻的横隔板,从而组装成了一个标准的半桥宽度钢箱梁梁段模型。其中 800 mm 和 500 mm 直径主拱圈长度均为 3 m,600 mm 直径主拱圈长度为 2 m。针对边界条件,实施了钢箱梁的对称约束策略,具体约束了其横向移动、竖向移动以及横向转动的自由度。横系梁对称中心处所有节点约束 DX、RY 和 RZ;支座处约束支座部分横向节点,约束 DZ;边跨钢箱梁约束 DY 和 RX。全桥整体计算模型如图 2 所示,拱脚结构计算模型如图 3 和图 4 所示。

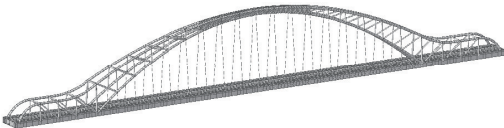


图 2 全桥整体模型图

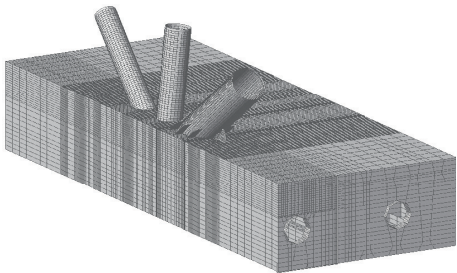


图 3 拱脚结构模型图

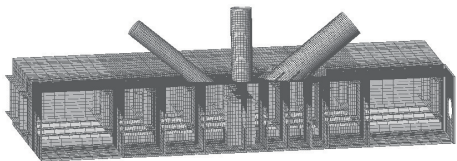


图 4 拱脚处钢箱梁横隔板布置图

2.3 计算荷载及工况

计算考虑承载能力组合,提取整体计算模型的最不利组合内力,分别施加在拱圈模型和钢箱梁模型的端部。

其中 800 mm 直径主拱圈处施加荷载为轴力 9 156 kN,弯矩 470 kN·m,扭矩 249 kN·m,剪力 125 kN;600 mm 直径主拱圈处施加荷载为轴力 505 kN,弯矩 99 kN·m,扭矩 25 kN·m,剪力 20 kN;500 mm 直径主拱圈处施加荷载为轴力 825 kN,弯矩 19 kN·m,扭矩 5 kN·m,剪力 6 kN;中跨钢箱梁处施加荷载为轴力 5 563 kN,弯矩 3 456 kN·m,剪力 333 kN。

3 计算结果

将模型的计算结果进行汇总。

(1) 拱脚结构受力状况

如图5至图10模型计算结果所示,各拱脚的应力分布特征明显。800 mm 直径主拱圈拱脚承受了最大的应力,包括 120 MPa 的最大主拉应力、205 MPa 的最大主压应力和 103 MPa 的最大剪应力,其中主压应力的最大值出现在拱脚结构边缘受外力作用处,显示出应力集中的现象。相比之下,500 mm 和 600 mm 直径主拱圈拱脚的应力水平较低,其最大主拉应力和主压应力分别为 49 MPa 和 84 MPa,最大剪应力为 46 MPa。在 800 mm 直径主拱圈拱脚底部,加劲肋的应力也较大,特别是与钢箱梁焊接的边缘处,由于应力集中,最大主拉应力、主压应力和剪应力分别达到 94、225、112 MPa。从应力分布图来看,800 mm 直径主拱圈区域的压应力较高,而 500 mm 和 600 mm 直径主拱圈拱脚区域的压应力相对较低。此外,拱脚与顶板连接处存在较大的拉应力,拱脚底部加劲肋上方的区域压应力也较大。拱圈截面的应力分布特征表现为底部应力高于顶部,且随着位置向上移动,压应力逐渐递减。在设计阶段,为了确保受压构件的稳定性能,特别是在拱脚区域(尤其是 800 mm 范围内),特别增设了加劲肋以增强结构稳定性,从而满足既定的设计要求与稳定性标准,并有效减小了拱脚结构的受力。其他拱脚处由于应力较小,未布置加劲肋,便于桥梁施工。

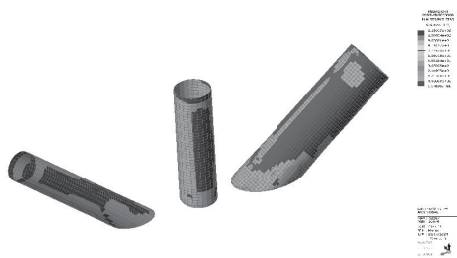


图5 拱脚主拉应力模型计算图(单位:MPa)

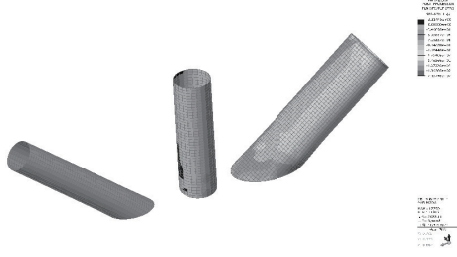


图6 拱脚主压应力模型计算图(单位:MPa)

(2) 系杆箱受力状况

根据模型计算应力结果(见图11至图14),系杆

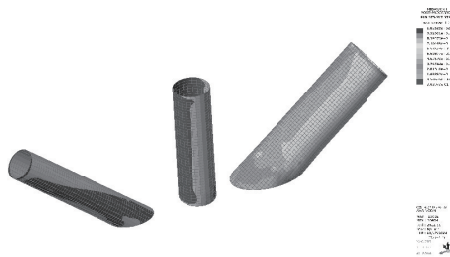


图7 拱脚剪应力模型计算图(单位:MPa)

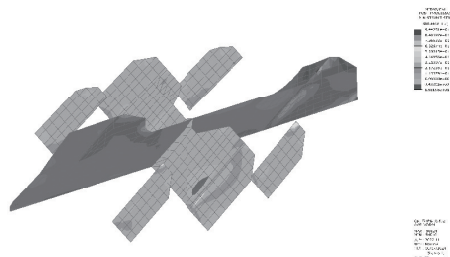


图8 800 mm 直径主拱圈拱脚加劲肋主拉应力模型计算图(单位:MPa)

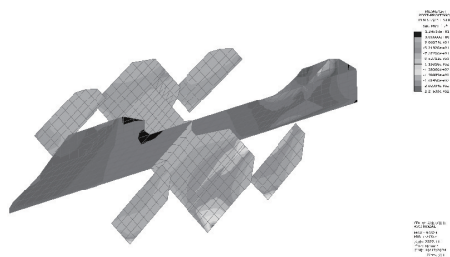


图9 800 mm 直径主拱圈拱脚加劲肋主压应力模型计算图(单位:MPa)

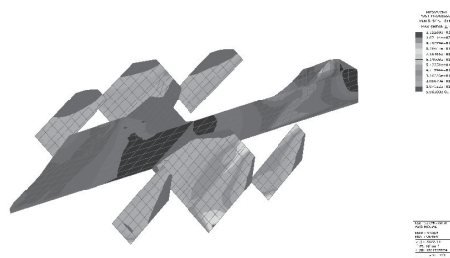


图10 800 mm 直径主拱圈拱脚加劲肋剪应力模型计算图(单位:MPa)

箱的各组成部分展现了特定的受力特性。具体而言:顶板承受的最大主拉应力为 121 MPa,最大主压力为 159 MPa;横隔板则承受了最大 73 MPa 的剪应力;腹板的最大剪应力则为 68 MPa。从这些数据可以看出,系杆箱的顶板、横隔板和腹板所受的力值均处于较低水平,并未成为设计的控制因素。进一步分析系杆箱的受力状态发现,800 mm 直径主拱圈拱脚处的顶板受力最为显著。同时,拱脚处设置的横隔板有效地分散了拱脚的受力,其中,中心横隔板受力最大,而两侧横隔板的受力逐渐减小。此外,系杆箱的两道腹板受力分布均匀,这表明腹板的布局设

计是合理的。综上所述,系杆箱的整体受力状态良好,各部件的应力分布符合预期设计目标。

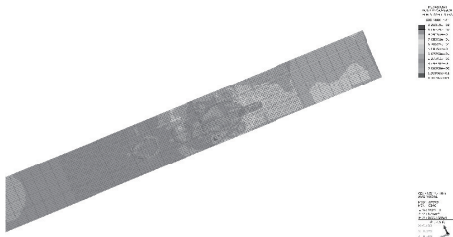


图 11 系杆钢箱梁顶板主拉应力模型计算图(单位:MPa)

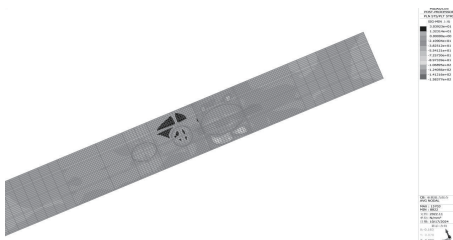


图 12 系杆钢箱梁顶板主压应力模型计算图(单位:MPa)

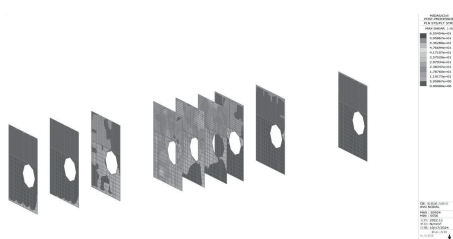


图 13 系杆钢箱梁横隔板剪应力模型计算图(单位:MPa)

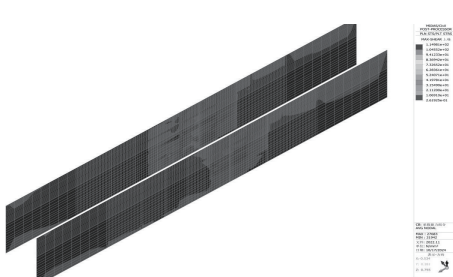


图 14 系杆钢箱梁腹板剪应力模型计算图(单位:MPa)

基于计算结果分析,该桥梁的拱脚构造被巧妙地置于系杆箱腹板之间,并辅以加密横隔板及加劲肋,此布局展现了高度的合理性。横隔板的应力分布特征明显,仅在拱脚邻近区域承受较大应力,而远离拱脚的横隔板因腹板的隔离作用,应力显著降低,这表明拱脚应力传递具有局限性,对远端横隔板设计不构成显著影响。拱脚的力传递机制高效,通过顶板、横隔板及腹板的协同作用,实现了应力的均匀扩散,有效利用了横隔板的整体强度,促进了应力的广泛分布。此外,800 mm 直径主拱圈拱脚的应力沿拱圈方向逐渐递减,底部应力集中,因此,底部与钢箱梁连接区域的构造细节及材料厚度须予以强化,以确保结构的安全与稳定。

4 结 语

该文主要介绍了提篮桁架系杆拱桥的拱脚结构设计计算过程,借助有限元分析技术,精确绘制了拱脚结构的应力分布图谱。通过深入分析,揭示了拱脚部位、加劲板、系杆箱横隔板以及腹板的受力分布特性,为同类拱脚结构的计算分析与设计提供了参考依据和计算范例。

参考文献:

[1] 叶梅新,余山川,谢晓慧.140 m 下承式钢箱系杆拱桥拱脚局部模型试验研究[J].黑龙江科技信息,2008(34):345.
[2] 颜海.大跨度系杆拱桥拱脚结点局部应力分析[C]//2002 年年会学术论文集.北京:中国公路学会计算机应用学会,2002.
[3] 赵安华.钢箱提篮拱桥拱脚过渡段局部应力研究[J].城市道桥与防洪,2017(5):108-111.
[4] 顾晓毅,袁建兵.大跨度钢桁架拱桥拱梁结合关键节点设计[J].城市道桥与防洪,2021(5):93-95.
[5] 刘安兴.某大跨度下承式钢箱提篮拱桥力学性能分析[J].公路,2020,65(3):121-126.

《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

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadbridgeflood@163.com

