

外倾式拱桥拱肋安装支架设计与应用

赵立波, 庞 康, 师翔宇, 黄凯旋, 周颂颂

(中交路桥华东工程有限公司, 上海市 200120)

摘 要: 针对桥梁施工支架作为临时承载结构的关键作用, 为确保外倾式拱肋施工过程的安全性及结构稳定性, 开展支架优化设计研究, 避免因设计缺陷引发坍塌事故, 减少人员伤亡及经济损失。以奚家港大桥外倾式拱肋施工支架为研究对象, 提出两种不同的支架设计方案, 建立三维有限元模型, 通过数值模拟对支架体系进行强度分析、刚度分析及稳定性分析, 对比两种方案的力学性能差异。研究表明, 两种不同的支架设计方案均能满足施工要求, 但各有优劣, 为类似桥梁工程的支架设计提供了重要的参考依据。研究成果可为同类桥梁施工提供理论依据与设计参考, 有效降低工程风险。

关键词: 外倾式拱肋; 桥梁施工支架; 有限元分析; 强度; 刚度; 稳定性

中图分类号: U445.4

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0205-05

Design and Application of Outward-inclined Arch Rib Erection Supports for Arch Bridges

ZHAO Libo, PANG Kang, SHI Xiangyu, HUANG Kaixuan, ZHOU Songsong

(China Communications Construction Road and Bridge East China Engineering Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Regarding the crucial role of bridge construction supports as temporary load-bearing structures, to ensure the safety and structural stability during the construction of outward-inclined arch ribs, the optimization design and research on the supports are conducted to prevent the collapse accidents caused by design defects, thereby reducing the casualties and economic losses. Taking the construction support for outward-inclined arch ribs of Xijiangang Bridge as the research object, two different support design schemes are proposed. The three-dimensional finite element model is established to perform the numerical simulations for strength analysis, stiffness analysis, and stability analysis of the support system. The mechanical performance differences of the two schemes are compared. The results demonstrate that both different design schemes of supports can meet the construction requirements, but each has its own advantages and disadvantages, which provides the valuable references for support design of the similar bridge projects. The research outcomes offer the theoretical basis and design guidance for the construction of the similar bridges, and the engineering risks can be effectively reduced.

Keywords: outward-inclined arch rib; construction support of bridge; finite element analysis; strength; stiffness; stability

0 引 言

近年来,随着中国交通基础设施建设的迅猛发展,公路、铁路及水运桥梁工程数量持续增长,桥梁结构形式日趋复杂化、大型化。在这一进程中,施工安全尤其是临时支撑结构的安全性成为制约工程顺利实施的核心问题之一。据统计,桥梁施工安全事故中,因支架设计缺陷或承载力不足导致的坍塌事故占比高达 30% 以上,不仅造成重大经济损失,更严重威胁施工人员的生命安全。

收稿日期: 2024-11-19

作者简介: 赵立波(1990—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁设计及建设工作。

作为桥梁施工过程中关键的临时承载结构,施工支架的力学性能直接影响拱肋拼装精度、施工效率及整体结构稳定性。特别是针对外倾式拱肋这类空间受力复杂、几何非线性显著的异形结构,对结构的强度、刚度及稳定性提出更高要求。然而,传统支架设计多依赖经验公式或简化二维模型,难以精准模拟实际三维受力状态,易导致局部应力集中或屈曲风险,成为施工安全的潜在隐患。现有研究表明,支架优化设计通过引入精细化数值模拟技术,可显著提升结构安全冗余度,但针对外倾式拱肋支架的系统性研究仍较为匮乏^[1-2]。

基于此,以奚家港大桥外倾式拱肋施工支架为研究对象,聚焦支架设计的科学性与工程适用性。

通过提出2种支架方案,构建三维精细化有限元模型,模拟支架的强度、刚度及稳定性对比分析。研究成果不仅为同类桥梁施工提供理论支撑,还可推动临时结构设计从“经验主导”向“数据驱动”的范式转变,对提升桥梁施工安全水平具有重要工程意义。

1 工程概况

奚家港桥是一座采用中承式外倾飞燕式系杆钢拱桥结构,其设计具有独特的跨径组合,包括30 m、120 m和30 m的跨度,总长度达到180 m,宽度从35 m渐变至39.5 m。该桥的主拱部分由钢箱构成,宽度为1.8 m,高度为2.2 m,呈现出飞燕式的布局,其中主跨的跨度为120 m,矢高为28 m,外倾角度为 13.89° 。主梁的设计为开口式钢梁,主跨部分采用横向受力结构,两侧拱肋位置各设有一个斜腹板箱室系梁,这些系梁之间铺设了由纵向和横向梁组成的钢桥面板。边跨则采用纵向受力结构,使用单箱双室截面系梁,钢桥面板的布置与主跨保持一致。全桥共有11对,总计22根吊杆,这些吊杆由 $\phi 15-16$ 的钢绞线构成,桥面的吊点位于系梁中心线以内300 mm的位置,而拱肋的吊点则位于拱轴中心,与拱轴平面形成特定的夹角。系杆则采用 $\phi 15-68$ 的钢绞线,其锚固位置设在距离跨中55.5 m的地方,主梁系杆的锚固区域局部4 m范围内进行了混凝土灌注,奚家港桥断面布置见图1,立面布置见图2。

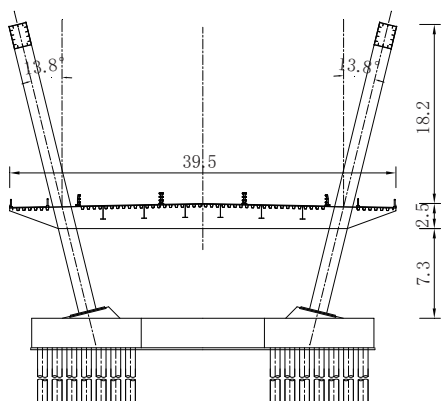


图1 奚家港桥横断面布置图(单位:m)

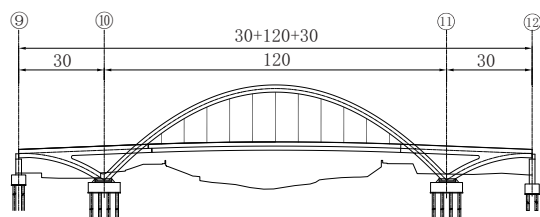


图2 奚家港桥立面布置图(单位:m)

2 外倾式拱肋支架设计方案

2.1 支架设计

拱肋支架是拱肋在合龙前的核心承载结构,支架设计必须适应桥梁的构造特点和拱肋的安装方法。在本桥中,拱肋为外倾式,支架设计时需考虑水平和竖直2个方向荷载共同作用,桥梁采用“先梁后拱”的安装方案,支架除了需保证承载拱肋的能力外,还应满足梁的承载要求。根据项目特点,在拱肋支架设计时拟定了2种方案,分别为梁、拱分离式支架和梁、拱一体式支架,详见图3。

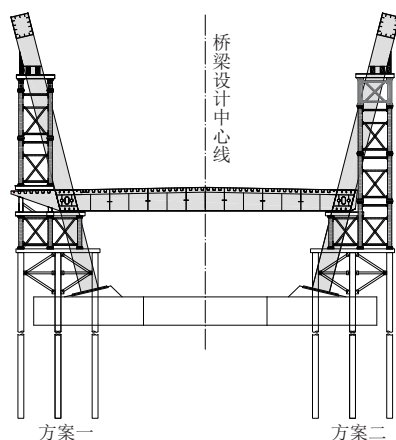


图3 支架的横截面布局图(单位:m)

方案1梁、拱分离式支架为两组独立的支架,主梁拼装支架设置在主系梁和挑臂下方,在支架上拼装主跨钢梁。拱肋支架设置在钢梁挑臂上,焊接固定,与梁体支架投影面对齐。拱肋支架是由4根 $\phi 426 \times 8$ mm钢管组合而成的格构式支架,支架轴心尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$,高12.05 m。支架顶部和底部分别设置2根HW400 $\times$ 400 $\times$ 13 $\times$ 21型钢横梁做为分配梁,分配梁与支架使用劲板焊接固定。顶部分配梁上部设置H250 $\times$ 250 $\times$ 9 $\times$ 14型钢作为拱肋支点,型钢高度大于500 mm设置斜撑。

方案2梁、拱一体式支架为一组独立支架,主梁及拱肋支架均独立设置在水中支撑平台上,拱肋支架高18.3 m,截面尺寸及结构形式与梁、拱分离式支架一致,该方案需在拱肋形成稳定受力结构体系后,拆除支架,安装钢梁挑臂。

2.2 计算模型

为了模拟拱肋支架在施工过程中的受力特性,计算模型采用空间杆系有限元程序对结构进行模拟^[3]。有限元模型中主拱、副拱、主桥系梁、钢梁挑臂及对应的梁与拱支架等结构采用空间梁单元模拟,钢梁、拱肋与支架间的焊接通过刚性连接进行模

拟,2种支架结构形式的有限元模型见图4。

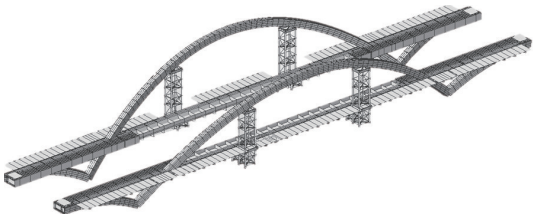


图4 计算模型图(图左上:梁、拱一体式、图右下:梁、拱分离式)

2.3 静力分析

拱肋分3段进行安装,当拱肋在支架上完成拼装且未形成稳定受力结构时,支架处于最不利工况,支架验算主要考察其在拱肋荷载、支架自重以及风荷载共同作用下的应力和变形。

方案1 梁、拱分离式拱肋支架静力分析结果见图5和表1,支架横向位移最大数值为10.9 mm,在风荷载(按最不利工况考虑,风向与拱肋外倾方向一致)和拱肋水平分力作用下向拱肋外倾方向变形,位于柱顶;竖向位移最大数值为1.9 mm,位于柱顶横向承重梁上;应力最大数值为95.8 MPa(压应力),位于柱顶承重梁拱肋支撑点处,均满足规范要求^[4]。

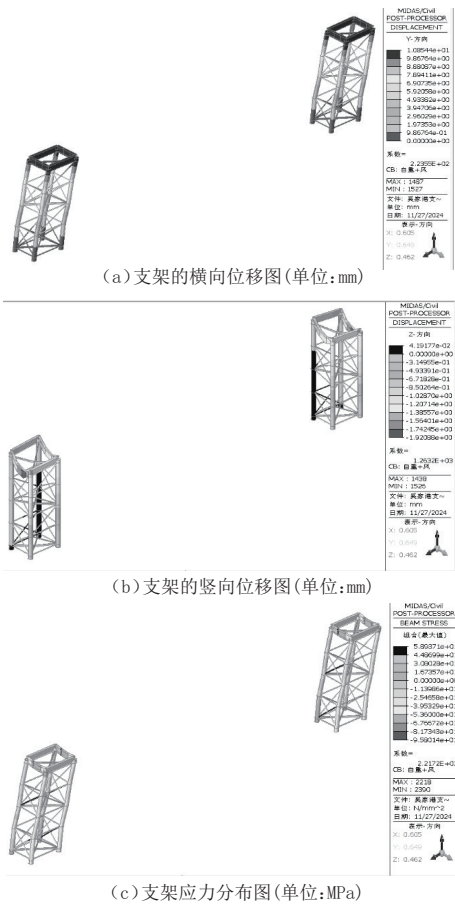


图5 梁、拱分离式拱肋支架数值分析结果图

方案2 梁、拱一体式拱肋支架静力分析结果见图6和表1,支架的横向位移最大数值为16.4 mm,在风

表1 自重+风荷载组合下拱肋支架应力与变形表

支架形式	最大应力/ MPa	最大水平 位移/mm	最大竖向 位移/mm
梁、拱分离式	95.8	10.9	1.9
梁、拱一体式	104.3	16.4	2.6
允许范围	190	(30.1/45.8)	10

荷载(按最不利工况考虑,风向与拱肋外倾方向一致)和拱肋水平分力作用下向拱肋外倾方向变形,位于柱顶;竖向位移最大数值为2.6 mm,向下变形,位于柱顶横向承重梁上;应力最大数值为104.3 MPa,为压应力,位于柱顶横向承重梁上,均满足规范要求。

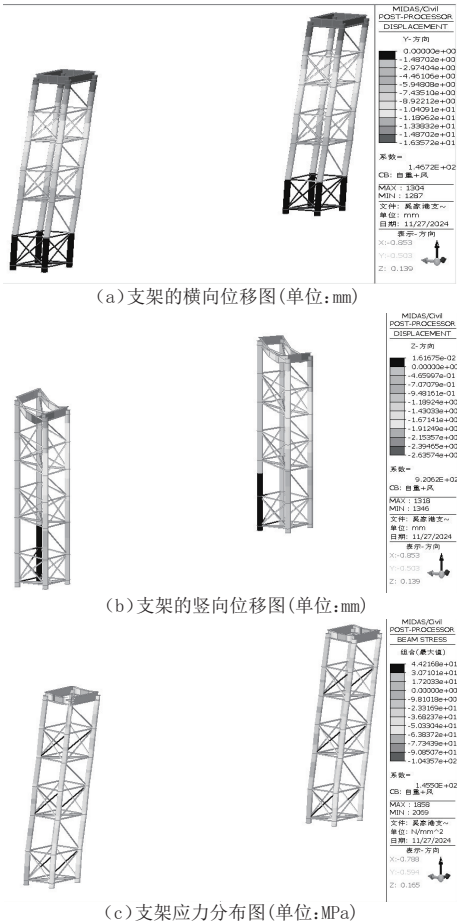


图6 梁、拱一体式拱肋支架数值分析结果图

2.4 稳定性分析

对支架的空间稳定性进行分析时^[5-6],发现两种不同的方案在拱肋拼装完成但未合龙的情况下,拱肋支架的稳定性有所不同。具体来说,方案1在第1阶模态下发生失稳破坏,其弹性稳定特征值为52.05,意味着临界荷载是拱肋、支架自身重量以及风荷载总和的52.05倍。对于更高阶的模态,即2阶、3阶、4阶和5阶,它们的临界荷载系数分别为52.09、52.64、52.66和61.95。而方案2在相同条件

下,第1阶模态的弹性稳定特征值为50.96,临界荷载是上述荷载总和的50.96倍,2阶、3阶、4阶和5阶模态的临界荷载系数则分别为50.98、52.48、52.55和55.55。值得注意的是,这两种方案的各阶模态的临界荷载系数均显著高于规范要求的设计限值4,由于方案1梁、拱分离式拱肋支架相对高度较小,临界荷载系数更大、稳定性相对更好。

3 支架方案比选

3.1 方案1优缺点分析

优点:(1)当采用相同截面构造时,分离式支架长细比更小,在相同外荷载作用下变形更小,更有利于拱肋拼装过程中线形控制;(2)与方案2相比,拱肋支架不会对主梁挑臂完整性造成影响,可一次性完成桥面结构(系梁、挑臂等)吊装,施工效率更高。

缺点:拱肋支架需设置在主梁挑臂上,增加了施工阶段主梁挑臂的上部荷载。

3.2 方案2优缺点分析

优点:方案2拱肋支架直接设置在水中支撑平台上,拱肋及支架荷载不作用在主梁挑臂上,减少了施工阶段主梁挑臂的上部荷载^[7]。

缺点:(1)拱肋支架搭设区域内主梁挑臂无法安装,导致系梁、挑臂无法一次安装成型,施工效率相对较低,且由于剩余挑臂需拱肋支架拆除后进行现场焊接安装,施工质量难以保证;(2)由上述建模计算结果对比分析可以看出,由于方案2的拱肋支架高度较高,相比于方案1而言方案2拱肋支架的应力及变形更大,同样施工阶段拱肋变形更大。

通过上述分析,采用方案1梁、拱分离式支架不但可以缩短施工周期,减少设备租赁时间,而且采用同规格支架,变形相对更小,更有利于支架结构稳定及拱肋安装过程中线形控制,综合优势明显。

4 外倾式钢拱桥及支架施工技术

4.1 外倾式钢拱桥总体施工顺序

奚家港桥的主桥施工采用了先架设梁体再安装拱架的技术方案,主桥施工流程:主桥基础及下部结构施工→水中支撑平台搭设→主梁及挑臂支架搭设→主梁结构安装→拱肋支架搭设→外倾式拱肋安装→吊杠张拉→拱肋、主梁支架依次拆除。为方便施工及缩短时间,临时墩拟采用钢管桩作为基础,现场施工情况见图7至图10。



图7 现场支架吊装施工图



图8 现场支架吊装施工图1



图9 现场支架吊装施工图2



图10 现场拱肋吊装施工图3

4.2 临时支架搭设施工顺序

水中钢管桩设置完成以后,在桩顶用双拼H400型钢搭设转换平台,平台上部设置重型支架用于承载上部拱肋及系梁。水中临时支架搭设采用模块化施工,先在地面将钢管每2根通过横撑和斜撑连接成片,然后由浮吊从地面将每一片支架吊至安装位置进行快速组装。支架顶部同样用双拼H400型钢搭设施工平台,用于拱肋的安装焊接。平台四周用脚手架管设置防护栏杆,确保施工安全。在支架内部安装了爬梯,以便作业人员能够上下移动,同时在

通道的边缘配备了安全生命线,用于固定安全绳索。每个支架采用4根直径426 mm,壁厚8 mm重型钢管,钢管之间用直径121 mm,壁厚5 mm钢管作为横撑与斜撑,使支架形成整体,确保整体强度满足要求。

4.3 施工注意事项

(1)拱肋支架需在桥面上生根,用以抵抗外倾式拱肋横桥向的弯矩,支架设计时需精确计算整体结构及焊缝,选择合适的方式、位置生根,确保梁体、拱肋及支架施工阶段的稳定性,拱肋支架在钢梁挑臂生根情况见图11至图12。



图11 现场拱肋支架生根图1



图12 现场拱肋支架生根图2

(2)在一侧系梁安装完成后,安装拱肋支架,系梁与边跨之间为断缝,系梁存在一定的倾覆风险,可采用型钢、连接钢板对主、边跨系梁,拱肋根部与梁体进行连接补强,提高施工阶段主、边跨,拱肋与梁体的整体性,防止倾覆。

(3)拱肋安装合龙等施工可选取风压较小的季节进行施工,以减少施工阶段拱肋及支架横向变形,降低施工风险。

5 结 论

通过对奚家港外倾式钢拱桥拱肋支架设计与优

化综合分析得到如下结论:

(1)外倾式拱肋支架设计过程中,利用主梁作为拱肋支架的支撑平台以降低支架高度,减少施工阶段拱肋及支架的横向变形;

(2)拱肋支架设计需充分考虑钢梁及挑臂安装施工,减少现场焊接次数以保证施工质量;

(3)针对主跨系梁与边跨系梁、拱肋根部与梁体进行补强连接,确保施工阶段结构整体性,降低施工倾覆风险。

参考文献:

- [1] 张亚杰,李世铭,胡晓东,等.下承式钢管混凝土拱桥拱肋施工支架安全性研究[J].水利与建筑工程学报,2019,17(3):204-207.
- [2] 王建国,李志强.异形拱桥施工支架优化设计方法[J].桥梁建设,2020,50(2):45-50.
- [3] 苏庆田,李伟,张立鹏,等.外倾式拱桥吊杆及临时支架施工顺序优化[J].结构工程师,2013,29(3):139-144.
- [4] 刘振宇,吴刚.桥梁施工支架变形控制标准研究[J].中国公路学报,2017,30(4):89-94.
- [5] 赵长军,王锋君,陈强,等.大跨度钢管混凝土拱桥空间稳定性分析[J].公路,2001(2):15-18.
- [6] 邢帆,祝兵,王学勇.下承式钢管混凝土拱桥稳定性研究[J].桥梁建设,2009(1):25-28.
- [7] 孙立军,杨文忠.模块化桥梁施工技术研究与实践[J].施工技术,2021,50(8):34-38.
- [8] 赵立波,陈浩,李鹏.飞燕式钢拱桥主跨安装方案比选分析[J].城市道桥与防洪,2022(3):118-120.
- [9] Smith J, Brown T. Composite Support Systems for Inclined Arch Ribs[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(7): 48-51.
- [10] 陈晓明,周涛.动态施工荷载下桥梁支架稳定性研究[J].工程力学,2018,35(6):112-118.
- [11] 张伟,黄辉.多尺度有限元法在临时结构分析中的应用[J].土木工程学报,2021,54(9):78-85.
- [12] 李明,王磊.钢管节点焊接缺陷对承载力的影响[J].焊接技术,2019,48(3):23-27.
- [13] 赵海涛,马强.大跨拱桥施工支架失稳机理分析[J].工程力学,2020,37(5):134-141.
- [14] Timoshenko S P, Gere J M. Theory of Elastic Stability[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2009: 205-230.
- [15] 周志祥,李乔.随机风荷载下桥梁结构振动响应研究[J].振动与冲击,2016,35(12):56-61.
- [16] 胡庆安,王新敏.桥梁施工临时结构荷载传递模型[J].铁道科学与工程学报,2019,16(4):102-107.