

浅谈多跨连续拱桥施工

伍志远¹ 倪旭东² 韩兴焰³

1. 中国十七冶集团有限公司 安徽 马鞍山 243000

2. 中国十七冶集团有限公司建筑安装工程技术分公司 安徽 马鞍山 243000

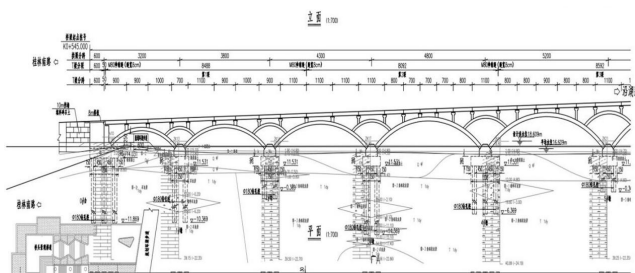
3. 屏山县宜江水务发展有限责任公司 四川 宜宾 645350

摘要: 多跨连续拱桥因兼具结构合理性与景观协调性,在交通工程领域应用广泛。本文以黄石市慈湖明月桥为例系统研究多跨连续拱桥的结构特性与施工核心要求,深入分析各类施工方法的适用场景及关键技术要点,探讨施工过程中的力学响应规律;针对施工控制、质量保障及安全防护等核心难点提出针对性对策,最后阐述施工工艺优化及未来发展方向,为多跨连续拱桥的高效建造与技术升级提供理论参考。

关键词: 多跨连续拱桥; 施工技术; 力学分析; 难点对策; 优化发展

引言: 拱桥作为经典桥型,凭借拱结构轴向承压优势,兼具优良跨越能力与经济性。多跨连续拱桥通过拱与墩台协同作用,适配河谷、湖泊等复杂地形,流畅线型亦赋予工程显著景观价值。随着交通建设对桥梁性能要求提升,多跨连续拱桥施工技术面临更高挑战,施工中结构稳定性控制、力学调控及质量安全保障直接关乎桥梁服役性能与耐久性。因此,本文以黄石市慈湖明月桥为例系统研究其结构特点、施工技术、难点对策及优化发展,对推动该类桥梁建造技术规范、智能化发展具有重要现实意义。

工程概况: 跨磁湖大桥全长846m,宽30.6m,采用双向四车道技术标准,设计速度为50km/h。设计汽车荷载标准: 桥梁,路面结构设计荷载标准为BZZ-100标准轴载。地震动峰值加速度为0.05g;设计基准期为: 桥梁100年,沥青路面15年。桥梁结构形式采用17孔连续钢筋混凝土葵花形拱桥,在两主拱之间设置一个腹拱,腹拱圈16孔,主拱圈采用悬链线式无较拱,腹拱圈采用圆弧式两较拱。主拱和腹拱上设置立柱、盖梁、立墙、盖梁、立墙上架设85cm高的预制钢筋混凝土矮T梁。桥台和拱座基础均采用钻孔灌注桩。



1 多跨连续拱桥的结构特点与施工要求

1.1 结构特点

多跨连续拱桥的核心结构特点体现为空间协同受力与几何形态关联性。在受力特性上,不同于单跨拱桥,其荷载通过拱上结构及桥墩的变形实现跨间传递,形成多跨协同受力体系,边跨与中跨的受力状态相互影响,呈现从边跨到中跨受力逐渐增大的分布规律,中孔主拱最大轴力可达边孔的2-3倍。水平推力是该类结构的关键力学特征,成桥后不平衡推力主要由桥台承担,施工阶段则需通过特殊构造平衡水平效应。在结构形态上,拱圈多采用圆弧、抛物线或悬链线等合理线型,主拱截面高度常随跨径变化呈阶梯式调整,以适配受力梯度需求。多跨连续拱桥的整体性较强,任一跨的结构变形或损伤均可能引发全桥力学状态的连锁反应,对结构刚度的连续性要求较高^[1]。

1.2 施工要求

多跨连续拱桥的施工需严格遵循协同性、精准性与阶段性原则。一是基础与拱座施工需保障承载稳定性,拱座与地基的连接强度需满足水平推力传递要求,避免施工初期出现不均匀沉降。二是要严格控制施工分段与落架顺序,通常采用分联施工方式,将全桥划分为3-5孔一联的施工单元,联间设置止推墩弱化跨间干扰,落架过程需同步监测拱圈变形,确保卸载均匀。三是施工过程中的线形与内力控制精度要求较高,主拱关键截面(拱顶、3/8截面、拱脚)的应力与位移需实时监控,避免出现过大拉应力,一般要求主拱截面拉应力不超过2.0MPa。四是需重视结构的时间效应影响,充分考虑混凝土收缩徐变对结构内力重分布的作用,合理安排施工间隔时间。

2 多跨连续拱桥施工方法与关键技术

2.1 施工方法分类与选择

多跨连续拱桥的施工方法需结合跨径规模、结构形

式及施工环境综合选择,主流方法包括支架现浇法、悬臂拼装法、劲性骨架法及预制肋拱架设法等。(1) 支架现浇法适用于中小跨径(15-30m)桥梁,通过搭设满堂支架实现拱圈整体浇筑,具有施工工艺简单、成型质量易控制的优势,但受地形条件限制较大,对支架刚度要求较高。(2) 悬臂拼装法适用于大跨径连续拱桥,通过分段预制拱肋并逐段悬臂拼装,配合扣挂系统控制变形,可减少对桥下空间的占用,适用于跨越航道或深谷的工程场景。(3) 劲性骨架法多用于大跨径混凝土拱桥,通过先安装钢骨架形成受力支撑体系,再进行混凝土浇筑,能有效降低施工过程中的结构自重效应。(4) 预制肋拱架设法则依托工业化预制生产,通过吊装拼接实现快速施工,可显著提升施工效率,适用于标准化程度高的多跨连续拱桥。施工方法选择需综合考量跨径参数、地形条件、施工周期及设备能力。本项目跨慈湖河,因施工期间无通航需求,以桥梁施工的质量、安全、进度与成本为核心控制目标,从保护磁湖水域环境、施工便利、材料运输安全、材料周转利用、标准化施工等方面开展多方案比选,最终选择钢栈桥作为主施工通道,采用钢管桩+贝雷梁+盘扣架组合式支架现浇法施工。钢管桩、贝雷梁、盘扣架等材料可周转应用于后续拱圈施工及同类工程,有效降低综合施工成本;同时,钢管桩的回收复用也减少了对湖水的污染。

2.2 关键施工技术

多跨连续钢筋混凝土葵花形拱桥的关键施工技术以支架法为核心,重点围绕基础处理、支架搭设、拱圈架设、线形控制及节点连接五大环节展开,确保施工安全与装配精度。(1) 基础处理需兼顾地质条件与支架承载需求,采用 $\Phi 1.8-2.0\text{m}$ 钻孔灌注桩作为桥台及拱座基础,止推墩承台厚度 $\geq 2.0\text{m}$ 、普通墩承台厚度 $\geq 1.5\text{m}$,同时对支架下方地基进行换填压实处理,确保承载力满足支架施工要求。(2) 支架搭设是核心环节,现浇支架采用 $\phi 630*10$ 螺旋钢管桩为基础,管桩上部分配梁为2156b工字钢,主纵梁为“321式贝雷梁”采用45型以及90型支撑架连接,贝雷架顶横向分配梁为I20号工字钢,工字钢上搭设盘扣架,立杆间距 $1.2\text{m} \times 1.2\text{m}$,横杆步距 1.5m ,支架搭设后需进行分级预压,预压荷载为设计荷载的1.2倍,消除非弹性变形,控制弹性变形不超过 30mm 。(3) 拱圈架设依托支架原位拼装,主拱圈按悬链线无铰拱、腹拱圈按圆弧两铰拱分段吊装,严控拼装错台 $\leq 2\text{mm}$,支架临时支撑需设置防滑限位装置,保障拼装过程稳定。(4) 线形控制采用三维激光扫描与BIM模型协同,实时调整支架高程,实现拱轴线形毫米级控制。(5) 节点连接需保障

传力连续,主拱与腹拱连接节点增设传力构件及加强筋,立柱与盖梁、矮T梁连接部位加密钢筋,结合荷载标准精准控力,平衡墩顶水平推力^[2]。

2.3 施工过程中的力学行为分析

多跨连续拱桥施工过程的力学行为具有显著的时变性与阶段性,不同施工阶段的结构受力状态差异明显。(1) 基础及拱座施工阶段,拱座承受的竖向压力随施工荷载逐步增大,需控制地基沉降速率不超过 2mm/d ,避免不均匀沉降引发拱座开裂。主拱圈分联施工阶段,未形成全桥连续体系前,单联结构的稳定性依赖临时支撑,此时拱脚截面承受较大负弯矩,上侧易产生拉应力,通过设置止推墩可使拱脚水平位移减小约50%,显著改善应力状态。(2) 拱上结构施工阶段,随着横墙、腹拱及填料的逐步施工,主拱的轴力持续增大,拱顶截面由施工初期的正弯矩逐渐趋于稳定,中孔拱顶最大弯矩可达 $4726\text{kN} \cdot \text{m}$,需通过实时监测调整施工加载顺序。(3) 落架阶段是力学状态突变的关键节点,荷载由临时支架向主体结构转移,需采用分级卸载方式,每级卸载量不超过总荷载的20%,避免结构产生冲击效应。(4) 收缩徐变阶段的力学响应主要表现为内力重分布,混凝土收缩会导致拱圈产生收缩应力,徐变则会使结构变形缓慢发展,需通过合理设置施工间隔,使收缩徐变完成度达到70%以上再进行后续工序^[3]。(5) 整体而言,施工过程中的结构力学行为呈现“逐步加载、逐级稳定”的规律,关键截面的应力与位移需控制在允许范围内,确保结构安全过渡至成桥状态。

3 多跨连续拱桥施工难点与对策

3.1 施工控制难点

多跨连续拱桥的施工控制难点:主要源于结构受力复杂性、环境因素干扰及施工过程中时变性三大方面。(1) 多跨协同受力导致控制参数关联性强,拱肋线形、内力状态与墩台位移相互影响,单一参数调整易引发连锁反应,传统控制方法难以实现多目标协同优化。(2) 环境因素对施工控制影响显著,温度变化会导致拱肋产生伸缩变形,每升高 10°C 拱肋轴向伸长量可达 15mm ,风荷载则会影响悬臂拼装阶段的结构稳定性,增加线形控制难度。(3) 施工过程的时变效应突出,混凝土收缩徐变、材料性能演化及施工荷载累积均会导致结构力学状态动态变化,控制精度难以保障。

对策方面:(1) 需采用精细化协同控制策略,建立基于BIM的全流程数字化控制平台,整合线形、内力、温度等多维度监测数据,实现参数联动优化;(2) 采用温度补偿技术,在构建拼装时预留温度变形量,并选择夜

间低温时段进行关键节段合龙；（3）运用倒拆-正装联合合法计算施工各阶段的控制参数，融合逆向初始索力求解与正向迭代修正机制，提升控制精度。

3.2 质量控制难点

质量控制难点：

主要集中于混凝土施工质量、构件连接精度及隐蔽工程质量保障三个核心领域。（1）混凝土施工方面，拱圈属于大体积混凝土构件，浇筑过程中易产生温度裂缝，尤其在拱脚与拱顶等应力集中部位，裂缝控制难度较大；钢管混凝土拱的混凝土灌注密实度难以直观检测，易出现空洞、不密实等缺陷^[4]。（2）构件连接方面，T梁的拼接精度直接影响结构受力连续性与桥梁线性及美观。（3）隐蔽工程方面，基础桩基的成孔质量、钢筋保护层厚度及预埋件位置精度难以全面监测，存在质量隐患。

对策方面：（1）主拱圈混凝土浇筑采用分层分段对称工艺，使用低热高性能混凝土，掺入矿物掺合料降低水化热，控制内外温差不超过25℃，对超过36米跨度拱圈在拱顶、3/8截面、7/8截面处设置合拢段，减少混凝土变化对拱圈的影响。（2）构件连接质量控制采用三维激光扫描定位技术，实现拼接精度控制在3mm以内，焊接接头采用无损检测技术全面探伤。（3）隐蔽工程质量控制推行全过程可视化监测，在桩基施工中采用钻孔成像技术，钢筋安装过程中使用定位卡具，确保关键参数符合设计要求。

3.3 安全风险与应对措施

多跨连续拱桥施工过程中的安全风险：主要包括结构失稳、高空坠落、吊装事故及地质灾害诱发风险。（1）结构失稳风险集中于拱圈混凝土浇筑与落架阶段，主拱圈混凝土自身荷载及未按浇筑顺序引发支撑体系失稳，落架顺序不当则可能导致结构整体坍塌。（2）高空坠落风险源于拱肋架设、桥面铺装等高空作业环节，作业平台防护不当易引发安全事故。（3）吊装事故多由设备选型不当、吊装指挥失误或构件重量偏差导致。（4）地质灾害诱发风险则常见于山区工程，施工扰动可能引发边坡滑坡、地基沉降。

应对措施：（1）建立建全流程风险防控体系；结构失稳防控采用实时稳定性监测系统，对支撑体系设计限值，混凝土浇筑前采用循环加载法进行预压；落架过程设置分级卸载标识，同步监测结构应力变化。（2）高空作业安全防护搭建标准化作业平台，设置双重防护栏杆与安全网，作业人员配备防坠器；吊装安全控制需进行

设备能力验算，选用起重量大于构件重量1.5倍的吊装设备，建立专人指挥机制，实施吊装全过程监控；地质灾害防控需提前开展地质勘察，对边坡进行预加固处理，设置沉降与位移监测点，实时预警风险。

4 多跨连续拱桥施工优化策略与未来发展方向

多跨连续拱桥施工受跨度布局、结构受力复杂等因素影响，易出现支架失稳、拱肋精度不足等问题，优化策略重点围绕核心环节展开，兼顾安全、经济与高效。支架体系采用碗扣式与贝雷梁组合模式，经荷载试验优化间距，减少损耗；拱肋采用预制拼装与现场浇筑结合工艺，精准控制精度、避免裂缝；同步优化施工流水与设备配置，缩短工期、降低成本，强化全过程监测保障质量安全^[5]。其未来发展方向聚焦三大维度：一是智能化施工，依托BIM、物联网技术实现支架变形、拱肋精度实时监测与参数自动调整，提升施工智能化水平；二是绿色低碳化，推广环保材料与节能设备，减少施工扬尘、噪声污染，实现施工与生态协同；三是轻量化与标准化，研发新型轻质高强材料，推动拱肋预制标准化生产，降低施工难度、提高效率。未来，需持续融合新技术，推动多跨连续拱桥施工向更高效、绿色、智能的方向发展。

结束语：多跨连续拱桥的施工技术受结构特性、环境条件及工程要求的多重影响，其核心在于实现结构力学状态的精准控制、施工质量的全面保障与安全风险的有效防控。本文研究表明，通过合理选择施工方法、应用智能化监测技术、实施多目标协同控制，可有效解决施工过程中的核心难点；并提出施工优化策略与未来发展方向。可进一步聚焦智能建造技术的深度应用，构建全生命周期的数字化管理体系，为多跨连续拱桥的技术创新与工程应用提供更全面的支撑。

参考文献：

- [1]杜芳.大跨度连续刚架拱桥拱肋钢箱加固技术研究[J].交通世界,2025(8):115-117.
- [2]杨廷玺.大跨度拱加劲连续刚构拱桥施工关键技术[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2025,24(1):6-10.
- [3]常青.超大跨度连续梁拱桥快速施工工艺研究及应用[J].现代交通与冶金材料,2021,1(6):6-10.
- [4]李训祥,丁永峰.三跨连续钢箱系杆拱桥的设计与施工[J].城市道桥与防洪,2024(3):151-155.
- [5]程江浩.连续刚构拱桥施工线形控制技术研究[J].常州工学院学报,2025,38(5):9-16.