

钢管混凝土拱桥拱肋线形控制及施工精度控制研究

刘 为

中铁四局集团第二工程有限公司 江苏 苏州 215000

【摘要】：随着交通基础设施向大跨径、高承载及复杂地形条件方向发展，钢管混凝土拱桥因其“钢—混凝土组合”结构体系所具备的高强度与高刚度特性，在山区峡谷及城市景观桥梁中获得广泛应用。钢管外壳提供优良的受拉与约束性能，核心混凝土承担主要受压功能，二者协同工作，使拱肋截面承载能力与稳定性能显著提升。本文围绕钢管混凝土拱桥拱肋线形控制与施工精度管理问题，构建施工阶段分析模型，提出制造精度预控、吊装定位优化、焊接变形管理及灌注过程监测等系统化控制策略，并结合分阶段预测与动态纠偏机制，实现拱肋几何形态与设计拱轴的高精度匹配。研究形成结构分析与施工工艺协同的全过程控制方法，为大跨径拱桥施工精细化管理提供技术路径。

【关键词】：钢管混凝土；拱桥；拱肋；线形控制；施工技术；控制措施

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.051

前言

随着我国交通基础设施建设向大跨径、高等级与复杂地形条件不断延伸，桥梁结构形式正由常规梁桥逐步向受力效率更高、空间受力更合理的拱桥体系转变。在山区峡谷、高差河谷以及城市景观通廊等工程场景中，钢管混凝土拱桥凭借其承载效率高、自重相对较轻、整体刚度大以及施工适应性强等优势，已成为大中跨桥梁建设的重要结构形式。钢管与核心混凝土的协同受力机制，使该结构在抗压稳定性、延性储备及耐久性能方面均表现出较高水平^[1]。钢管混凝土拱桥在施工过程中涉及钢管节段制造精度、现场吊装定位控制、焊接热变形管理、支架体系刚度匹配、混凝土分仓灌注及内力转换等多个关键环节，各环节之间存在明显的耦合关系。因此，有必要在结构分析与施工工艺之间建立系统化的精度控制框架，通过施工阶段数值预测、制造端源头控制、过程纠偏技术与内部应变监测等手段，实现从“结构设计控制”向“全过程精度管理”的转型。

1 钢管混凝土拱桥结构特点

钢管混凝土拱桥属于典型的组合受力体系结构，其力学性能来源于钢管与核心混凝土之间的协同工作机制。在结构受力层面，拱肋主要承担轴向压力，同时在非对称荷载或施工阶段转换过程中产生一定弯矩与剪力。以跨径 180m、矢跨比 1/5 的单肋钢管混凝土拱桥为例，恒载作用下拱肋轴力约为 $2.8 \times 10^4 \text{kN}$ ，中跨弯矩控制在 $8.5 \times 10^3 \text{kN}\cdot\text{m}$ 以内，相较同跨径钢结构拱桥弯矩降低约 25%，显示出较优的受压拱效应。钢管给核心浇筑混凝土提供三维约束作用，混凝土抗压强度提高到 15%~25%，如果用的是 C60 混凝土，相当于承受压应力达到了 70MPa 以上，而钢管壁厚一般为 20~30mm 左右，屈服强度使用 Q345qD 或 Q420qE 级钢材，屈服强度分别是 345MPa、420MPa，能够满足大跨径稳定性的需求。

钢管混凝土拱桥多采取分节段拼装及分仓法浇筑的方法。钢管节段长度一般在 8-12 米之间，由加工厂里进行拼焊，然后

运到工地用高强度螺栓以及满焊的形式连接，焊接的质量等级不得低于一级，超声波探测的优良率达到百分之百的要求。在灌注混凝土时，为了避免发生离析或出现空洞的现象，把泵送的压力控制在 0.6 到 0.8MPa 之间，同时对每次灌制的高度控制不能超过 1.5m，在施工中还要对密实度加以保障，利用振捣与补压两种方法。

2 钢管混凝土拱桥拱肋线形控制方法

2.1 建立施工阶段分段计算模型并确定预拱度控制值

拱肋线形控制的第一个环节不是在现场测量，而是在施工之前进行分阶段的数值预报。对于钢管混凝土拱桥来说，应该建立起一个和施工工序完全匹配的有限元模型，在这个过程中把钢管的拼装、合龙以及混凝土分仓灌注的过程一一进行模拟，模型还要考虑到几何非线性、材料非线性以及支架弹性压缩影响。以一个 160m 跨径的双肋拱桥为例，在施工过程当中可以分为 12 种拼装工况和 4 种灌注工况，通过逐级加载的方式来计算各个阶段的一些关键控制点（拱脚、1/4 跨、1/2 跨）理论标高的变化值。经计算，每一段吊装后的中跨的累积挠度有大约在 18 到 22 毫米之间，如果不设置预拱度的话，在合龙之后线形将会比设计的拱轴低 15 毫米左右^[2]。施工管理过程中利用电脑端、移动端 APP 实现多端协同，现场管理人员在检查过程中发现的问题，通过手机进行上传和发起协作审批流程，实现业务流程线上化，管理可视化，数据可追踪，决策有依据。

2.2 构建高精度测量控制网与动态标高校核体系

在理论计算的基础上要建设一个全桥高精度的三维测量控制系统，在该系统内控制网应该设置成“一级基准网—二级施工控制网—拱肋监测点”，的一级基准站采用 GPS 静观测的方式，平面精度保持在 $\pm 2 \text{mm}$ 以内，高程使用的是二等水准测量，闭合误差小于等于 $\pm 3 \text{mm}$ 的水准测量，而拱肋监测点则需要沿肋轴向每隔 8~10m 放置一控制断面，每段断面布置上下两点，用来判定截面转角及扭转情况，施工过程中，每次节段

装配完都要进行两次复测，且间隔时间大于 6 小时以上，以防受到温度的影响，当日温度变化量大于 10℃时，需要运用温度修正公式进行转化。实际测量数值与理论标高的差距大于 ±5mm，就要进行矫正处理。以连续观测形成的数值趋势线来判断，如果连续三次测量数值变化趋势相同，则认为是结构性的误差而不是随机误差，进而进入到下一步的修正步骤中去。拱肋施工时测量控制数据汇总如下表 1：

表 1 拱肋施工阶段测量控制数据统计

控制断面位置	拱脚 (左)	1/4 跨	1/2 跨	3/4 跨	拱脚 (右)
设计标高 H_0 (m)	42.5	48.26	50.38	48.24	42.48
实测标高 H_1 (m)	42.503	48.254	50.372	48.243	42.477
标高偏差 ΔH (mm)	3	-6	-8	3	-3
当日温差(℃)	6	12	14	9	6
温度修正值(mm)	0	1	2	0	0
修正后偏差(mm)	3	-5	-6	3	-3
是否启动纠偏	否	否(临界)	是	否	否

经实践证明，在观测次数维持一天两次的情况下，可以令累计误差维持在 ±4mm 以内。除此之外，相关研究表明，在高精度控制基础上利用 BIM 技术构建万能杆件构件库、拱肋预制节段、钢格子梁预制节段等构件，建立桥梁 BIM 模型，通过虚拟环境中快速模拟拼装，可精确尺寸控制、优化施工方案、减少误差和返工，为项目实施提供直观可视的资源。

2.3 采用可调支撑与同步顶升技术实施过程纠偏

如果在现场观测到有系统误差时，应当利用机械调节方法来进行过程中的校正而不是等到整个体系闭合后再一起校正，在拱肋安装阶段可以在支撑架上设置液压顶推装置以及可调楔形块系统，每一个支点处的推力不宜小于 300kN，行程限制在 ±20mm 之间。纠偏策略是实行分级微调的原则，每次移动不超过 3mm 并且调整之后再测量一次，例如某跨径为 180 米的拱桥，在中跨的标高是连续三度偏低达到 7mm，在两次顶升各 3mm 的情况下完成了校正，最终的误差小于 1.5mm；而对于不对称误差应当先调整误差的一侧支墩而不是整体抬升，防止突然的内力变化。并且在提升的同时对拱肋进行应力检测，在顶升的过程中实时检测拱肋应力的变化情况，使得对钢管应力上升控制在屈服强度的百分之十以内，也就是 Q345 的钢管应力的上升不超过 34MPa，利用支撑系统的参与调节线型的方式让控制转变为一种主动的调整行为。

2.4 优化混凝土分仓灌注顺序并实施闭环复核机制

拱肋线条型最后确定的关键在于混凝土浇筑过程之中，混

凝土自重所占比重为总恒载的 60% 以上，而如果混凝土浇筑顺序不合理就很容易导致出现较大的额外弯曲挠度，在控制方案上要采取的是“对称性，分段式，慢速”的方法来进行浇筑，每一仓跨度最好控制在 6-8 米以内，单仓浇筑时间最好别超过两个小时，泵送速度控制在 2.0~2.5m³/h 之间比较合适，两侧同时误差不能大于十分钟左右，保证荷载均匀增加^[3]。实际检测结果表明，在对称性浇筑的过程中中跨挠度的变化量大约为 12-15MM，如果是一侧先浇筑半个小时的话就会有超过 5MM 这样的一个偏差出现。灌注完毕之后一定要进行分段性的线性测量并且与有限元预计值比较，在误差超过 ±6mm 时应在下一仓位灌注之前进行调节。

3 钢管混凝土拱桥拱肋施工精度控制策略

3.1 提升钢管节段制造精度与工厂预拼装控制

拱肋施工准确性的根本就是从钢管节段加工开始做起，在工厂加工时出现的尺寸公差过大，会导致整个工地拼装成型之后出现无法修正的几何失准，所以对于厂内加工环节应当进行“板材下料—卷制—焊接—校圆—测量”的全链条精度把控。钢板下料尽量使用数控等离子切割机或者激光切割机，加工尺寸误差控制在 +1.0mm 以内；卷制圆度误差不超过 D/1000，即直径 3.0 米的钢管，其圆度误差不应大于 3mm。纵向对接焊缝必须是自动埋弧焊，焊缝余高的范围控制在 2-3mm 之内，错边量不得大于 1.5mm。加工完一节段之后，应该在加工厂做不少于三节段的试组装检验，检查各节段拼装后的累积偏差值，经验表明，在加工一节段的偏差 ≤2mm 的情况下，十节段累积误差 ≤±6mm；在一节段的偏差加大为 ±4mm 的情况下，其累积偏差值可能大于 15mm。所以工厂内的试组装可以很大程度上减少现场的纠偏工作量，有效保证了安装质量。钢管节段加工、预拼装精度控制数据如下表 2：

表 2 钢管节段制造及预拼装精度控制数据统计

控制项目	设计/规范要求	实测平均值	最大偏差值
下料尺寸误差(mm)	≤±1.0	±0.6	±0.9
卷制圆度偏差(mm)	≤D/1000 (≤3.0mm)	1.8	2.6
椭圆度控制值(mm)	≤3.0	1.5	2.4
焊缝错边量(mm)	≤1.5	0.8	1.2
焊缝余高(mm)	2~3	2.4	2.9
单节段轴线偏差(mm)	≤±2.0	±1.3	±1.9
三节段预拼装累积偏差(mm)	≤±4.0	±2.6	±3.8
十节段累计预测偏差(mm)	≤±6.0	±4.8	±5.9

3.2 优化节段吊装定位与临时连接工艺

现场吊装作业中的定位偏差通常是由于吊耳位置和临时固定的不合理产生的，在节段两端应安装三维调节定位装置即

横向限位板、纵向导轨、高度调整螺栓，吊装时采取两台起重机抬吊或者四点平衡吊装的方法来减少吊点之间的误差不大于 $\pm 50\text{mm}$ ，防止构件产生弯曲变形现象。就位后首先用4个高强度螺栓连接起来后焊接，临时螺栓施加预紧力约为70%的设计要求避免在焊接过程构件出现滑动现象。定位完毕以后要进行三维校正检查轴线偏差 $\leq 3\text{mm}$ ，高差偏差 $\leq 4\text{mm}$ ，倾斜度偏差 $\leq 1/2000$ 。如果出现偏差超差了应该马上用千斤顶或者调节机构调整过来，不允许有误差的情况下进行焊接操作。经过准确对准工艺及过渡措施，可以做到每一个截面安装误差控制在正负三毫米之间，有利于整体精度稳定的基础之上。

3.3 强化焊接变形控制与应力释放管理

钢管拱肋为大型环状封闭构件，焊接时热量输入分布不同容易造成残余应力及形状尺寸的变化，进而造成线性误差超标的问题。在此情况下需要使用分段对称焊接的方法，纵缝取自中部向两边进行焊接。而环缝则采用跳焊、分层逐道焊接的方式，每道焊缝的焊接热输入量一般控制在 $18\sim 22\text{KJ/cm}$ 左右，焊接层间温度不超过 250°C ，以减小热变形量大小。根据工地观测结果表明：当一次单边连续焊接长度大于了1.5米时，拱肋截面会产生 $2\sim 4$ 毫米的径向收缩变形。经过对称焊接方

法后，则可以将变形量降到1毫米以下的水平上。焊接完毕后应对重要部位的关键焊缝处进行局部振动时效或者控温缓冷以减小残余应力约15%-20%，并在焊接完成后第二次测量线形，如局部变形大于3毫米时应予以机械校形或者局部加热校形。

4 结语

钢管混凝土拱桥拱肋施工控制是超越了结构力学、钢结构制作及施工现场管控界限的一个综合性工程，在这里关键是如何利用准确预估和及时信息反馈来保证整个空间形态生成的过程是一个闭环的可控制系统。本文以结构力学特性为基础对线形控制以及施工精度的要求进行一体化的技术处理，从制造阶段开始就对线形进行管控直到现场吊装就位，再到焊缝变形控制到最后的混凝土浇筑检测，建立起一系列环环相扣的控制环节，相关研究结果表明只有当将结构阶段受力状态与施工工艺紧密结合在一起的时候，建立起不断调节和完善的过程才能达到毫米级高精度要求的目标。本文的研究成果为今后大跨径钢管混凝土拱桥的发展，提供系统的工程技术指导，同时为桥梁施工从经验型管理到数字化管理转变起到铺垫作用。

参考文献：

- [1] 聂建,梁胜阳,王美望,等.大跨钢管混凝土拱桥非对称斜拉扣挂索力优化[J].北方建筑,2026,11(01):134-139.
- [2] 陈明建.系杆拱桥钢管混凝土顶升灌注配合比优化与施工控制[J].四川水泥,2026,(02):158-160.
- [3] 徐粒寒,徐略勤,周建庭,等.封面图片说明[J].哈尔滨工业大学学报,2026,58(02):139.