

跨航道下承式系杆钢箱拱桥施工技术研究

郝运奇

中铁（上海）投资集团有限公司

摘要：系杆拱桥是结合拱梁结构受力优势于一身的组合桥型，拱梁结构在一起共同承受垂直和水平荷载，充分发挥梁受弯、拱受压的结构性能，桥梁内部为超静定体系，外部受力为静定结构。拱脚两端的水平推力由系杆承受，拱端支座不承受水平推力，兼具较大的跨越能力和较强的地质适应能力。本文以某市下承式系杆钢箱拱桥施工组织为例，在上跨航道的复杂外部环境下，通过研究分析主拱肋、拱梁结合段、系纵梁、端横梁、中横梁、风撑、系杆等构件制作安装顺序，采用大吨位浮吊分节段吊装组拼成型，对同类型桥梁的施工组织具有重要的参考价值。

关键词：系杆拱桥；节段拼装；施工监控

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.22.056

一、工程概况

本系杆钢箱拱桥为现状航道提升改造项目，按III级航道标准整治，规划河宽102m，通航净宽79m。桥位处航道中心线与道路中心线夹角约106度，通航净高7m。设计采用下承式系杆钢箱拱桥单孔上跨现状航道，桥梁整体斜桥正做整幅布置，计算跨径118m，桥梁长度122m，桥宽30.4m。

本桥钢结构主要为拱肋和桥面两大部分，设计重量约1924t。拱肋的拱轴线为二次抛物线，主拱肋矢高23.6m，矢跨比1/5，采用矩形钢箱断面，两片拱肋中心距19.2m，两片主拱肋之间设置五道一字箱型风撑，两端拱肋的拱梁结合段之间设置箱型端横梁连接。桥面又分为端横梁、中横梁、系纵梁、小纵梁等。拱肋和桥面通过拱脚进行连接，其中拱肋、风撑、端横梁和系纵梁为矩形箱形结构，中横梁、小纵梁为工字形结构，均采用焊接连接。系纵梁及横梁、小纵梁通过剪力钉与桥面板湿接缝连接成整体。每个系梁内设4根平衡拱肋水平力的系杆，采用梁端张拉方式。吊杆采用 ϕ s15.24填充型环氧涂层钢绞线，采用拱上固定、梁上张拉方式。

二、总体施工方案

在满足设计图纸要求和招标《技术规范》的前提下，考虑材料进场、加工制作、运输固定、吊装拼接等综合因素，错开东西两侧系梁和拱肋节段现场拼接焊缝位置，按照东侧系梁和拱肋节段长度为10.5m+29m+41m+31m+10.5m=122m，西侧系梁和拱肋节段长度为10.5m+36m+41m+24m+10.5m=122m的节段进行划分，采用先梁后拱方式，分段制作预拼，分段吊装成桥。根据桥梁设计结构特点，整体施工组织顺序主要为钢板预处理→零件下料→杆件、板单元制作→块体组拼制作→打砂、涂装→节段制作、预拼装→构件、节段运输→桥位吊装成桥。

（一）制造预拼

本系杆钢箱拱桥结构制造、吊装概括为两地和四阶段：两地即钢结构加工厂和桥位，四阶段即单元制造阶段、小节段组焊及预拼装阶段、大节段组焊阶段、工地拼装及焊接阶段。单元制造在工厂的车间内完成；小节段组焊及预拼装、大节段组焊在工厂总拼胎架区完成；工地拼装焊接在桥位支架上完成。

为减少节段桥位现场总拼工作量，更有效控制节段制造精度，依据拱梁结构设计特点，分别将拱梁结构划分为5个大节段。根据拱梁结合段、合拢段等大节段轴线线性，再将大节段划分成若干小节段，每个小节段再划分成若干下料焊接单元。下料焊接单元包括顶板、底板、内外腹板、横隔板（含吊点横隔板、普通横隔板）等，在工厂车间内完成制造，避免单元零散部件参与节段组拼。

拱脚结构形式复杂、连接方向多、焊缝最密集、焊接变形控制难度大，组装时梁拱结合段拱肋端口的几何形状、尺寸精度及定位点三维坐标值是控制的重点。由于拱脚与相邻拱肋节段长度偏大，拱脚与拱肋拟采用侧拼的形式进行试拼装。在完成拱脚与相邻拱肋节段试拼后，还需与相邻系梁节段及端横梁进行整体试拼装，保证桥位安装的准确性。

（二）吊装成桥

根据本项目的安装位置环境，拟选用内河浮吊对钢拱桥所有分段构件进行吊装就位，按照设计要求采用先梁后拱的施工方式进行。拱桥钢结构吊装的总体方案为：设置纵梁支撑架，分别进行桥面结构的安装；设置拱肋支撑架，分别进行拱肋、风撑结构的安装。拱桥钢结构吊装的具体顺序为：纵梁支撑架→梁拱结合段→端横梁→系纵梁→中横梁→小纵梁→挑臂；拱肋支撑架→钢拱肋主拱分3跨吊装→风撑→拱肋支撑架卸载→吊杆安装；初次调整吊杆索力→拱肋支撑架拆除→桥面预制板安装→湿接缝浇筑→系杆安装张拉→二次调整吊杆索力→成桥。

根据钢拱桥的设计跨度及构造，拟选用160t级的内河浮吊来承担节段构件的吊装任务。浮吊的作业区主要在规划钢拱桥的西侧的河道上。在浮吊进场前，需对航道的临岸边区域进行清淤，清淤深度满足浮吊吃水深度要求。浮吊行驶吊装区域水深必须大于2.5m，在河岸两侧布置地垄式锚点4个~8个，以供浮吊牵引。为保证施工期间河道能正常通航，需要在临时支墩之间设置通航孔，与现有河岸线平行设置。

1. 梁拱结合段和端横梁的安装

梁拱结合段全桥共计4块，单块重68.56T。端横梁全桥共计2块，单块重45.53T。梁拱结合段和端横梁的

临时支架由Φ609钢管、双榀H588型钢及钢支墩配50T扁平千斤顶（调整线形）组成。采用分块依次吊装形式，先吊装两侧梁拱结合段，再吊装中间端横梁，最后焊接成整体。

2. 桥面钢梁安装

钢桥面按两侧系梁顺桥向分为三段，中间段钢系梁单节重量63.96T，由水路运至施工现场。先安装两侧钢系梁，最后安装中间段钢系梁。两侧系梁间的横梁及小纵梁采用散件运输、现场拼接的方式。钢梁支架采用Φ609钢管、双榀H588型钢、钢支墩组成，支架共计四组，每组支架由4根Φ609钢管组成，钢管之间的间距为横桥向4000mm，顺桥向4000mm。每组支架之间的中心间距为顺桥向31+46+24m、横桥向19.2m，采用80T浮吊（36m扒杆）配置90KW振动锤进行施打。支架组在临时通航孔一侧设置防撞墩。

中跨主梁合龙之前，应根据制造精度、预拼数据、支架变形、风力温度等实际情况，对梁端位移进行测量，内容主要包括合龙段尺寸、线形、顶、底板高程，上下游外腹板处高程，轴线偏移等。

3. 拱肋安装

单侧拱肋在纵向分为3段吊装节段，两侧拱肋共计6个吊装节段，中跨拱肋吊装重量达109.49T。风撑不进行分段，单独进行安装。拱肋支架采用Φ609钢管、双榀H588型钢、钢支墩组成。Φ609钢管从钢梁支架接高，从钢梁的横梁与纵梁之间穿过。

拱肋合龙前，应先按照实际的施工进度确定拱肋合龙的时间范围，再根据历史气象资料及气象预测情况综合分析拱肋合龙具体时间。在两侧拱肋安装后，应按设计要求进行拱肋标高调整，在符合设计要求的前提下对合龙间距保持48小时的施工监控，根据预先确定的合龙温度、风力对应的间距确定合龙段最终长度。

4. 吊杆安装与张拉

本系杆拱桥共设置13对26根吊杆，均采用拱肋锚固，梁上张拉方式。吊杆共进行两次张拉：第一次张拉在拱肋安装完成后进行安装吊杆，并进行一次张拉。第二次张拉在浇筑完桥面板湿接缝混凝土后进行二次张拉。

5. 系杆安装和张拉

根据图纸设计要求，在全桥桥面板铺设完成并浇筑湿接缝混凝土后安装系杆。永久系杆安装到位后，应按设计要求的索力进行张拉，以平衡拱肋水平推力和桥面吊装所引起的水平力。系杆采用两端张拉，系杆两端锚头带紧后，根据箱梁内部定位逐步修正系杆线形，并对系杆应力和伸长量进行量化双控。

6. 桥面预制板安装

桥面预制板在工厂内加工，存放养护时间不少于6个月后运输至现场吊装。全桥共计18种类型90块桥面板，最大块桥面板尺寸为5575mm*3500mm*300mm，单块桥面板最大重量为15.2T。桥面预制板吊装采用50吨汽车吊，由南北两侧向跨中均匀分段吊装。如先从北侧开始吊装，在完成3至4排预制板吊装时，移至南侧开始吊装，以此类推直至全桥桥面板吊装完成。

三、吊装控制要点

（一）钢箱梁吊装和焊接

1. 拱梁结合段吊装定位后，两端及时加以固定，底部用型钢撑实并焊接。相邻主系梁安装后，立即安装两主梁间的横梁。

2. 边拱肋吊装定位后，顶底板处以工厂设置的固定板螺栓紧固连接，同时在两侧腹板施焊，每处施焊长度30厘米，支架处垫实临时固定后，方可卸载。

3. 首先焊接两系纵梁间横梁腹板的连接焊缝，其次焊接横梁上下翼板连接焊缝，对称同方向同速进行焊接。为减少焊接变形和约束应力，纵向焊缝应从跨中向两端对称施焊。

（二）拱桥安装的线型控制

1. 按施工图的深化数据，准确测量各个分段构件的安装定位的标高数值。桥面系分段构件安装定位后，再次复测各支撑点的标高数据，对比初次定位标高数值。

2. 分段构件在逐段安装过程中，加强施工监测频率，特别是临时支墩竖向变形，以便及时加固调整。

3. 在监控单位的监控和指导下，进行整桥的线型调整，梁拱结构合龙前以轴线线型控制为主，吊杆索力控制为辅；梁拱结构合龙后以吊杆索力控制为主，轴线线型为辅。

四、施工质量控制

（一）原材料

1. 严把进货关，根据有关技术指标对桥梁钢板进行严格验收，根据设计要求分别对照检查桥梁钢板出厂合格证、制造标识标牌、质量检验报告、厂家生产批号等。

2. 按照规范和设计图纸要求，对桥梁钢板原材料进行抽样复检，严格按照比例、抽样方法进行抽样，经监理旁站检查检验合格后方可用于工程，杜绝不合要求的材料进入现场。

（二）下料加工

钢板在切割前，应采用平板机进行矫平等预处理工作，控制钢板平整度偏差在1mm/m范围之内，不得出现褶皱、翘曲等不良现象。对于钢板的表面缺陷，应根据有关规定进行修补和处理。装配前，矫正每一构件的变形，保证装配公差符合要求。

（三）板单元

对钢结构进行合理分节，匹配驳船运能、通航限高，确保钢结构顺利进出场。板单元订货时，尽可能采用大定尺规格，以减少拼接焊缝数量。从焊接工艺、焊接顺序、焊接设备、焊接材料、焊接人员、焊接过程、焊接环境、焊接检查等方面对焊接质量进行管控。

（四）修整

钢结构的制作过程应严格执行“三检”制度，按照规范及设计要求，坚决贯彻落实质量检查否决制度。下料、修整、拼焊、钢梁拼装、焊接等工序，要保证加工机械设备正常运转和计量精度，对生产班组要做到技术交底清楚，质量要求明确，焊接规范齐全，焊接工艺可靠。

（五）组拼

为保证节段整体组装质量和精度，按照分步组装、分步修整的原则，各节段、单元严格按纵、横基准线及位置线对线组装。拼接组焊台架平台要有足够的刚度，钢箱拱肋起拱度及预拱度要准确无误，以保证钢箱拱肋结构的制作精度。

（六）涂装

桥梁拱肋和桥面钢结构涂装前，须对其表面进行除锈处理。根据现场工艺可采用喷丸或抛丸的方法进行，除锈等级须满足规范和设计要求。涂装作业时，应保证构件表面无雨水或结露，空气相对湿度不高于80%，环氧类漆环境温度不高于10℃，无机类富锌漆环境温度不高于5℃。涂装后4h内须采取防水保护措施，避免构件遭受雨淋。

（七）现场作业

在堆放、运输和架设过程中，为防止钢梁局部发生变形、失稳，在钢梁隔板或者腹板之间加一道横向框或者纵向框架。

钢箱梁吊至设计位置后，与前一梁段临时连接，精确调整位置，先栓接顶板钢肋，再焊接环缝，最后焊接纵向加劲肋嵌补段。所有焊缝质量、临时固定措施检查合格后，方可放松吊钩。

五、施工安全控制

1. 现场作业人员必须熟练安全操作规程，参加项目部、安质部、作业班组组织的三级安全教育，接受现场安全技术交底，经考试合格后方可上岗作业。进入施工现场的作业人员必须规范佩戴安全帽，着装应注重的安全和便捷性，高空作业人员必须佩戴安全带、扣好保险扣。

2. 吊装陆上和水上区域必须设置警戒线或防护墩，安排专人进行现场监护。吊装前应明确统一的指挥调度信号，构件进场或吊装时，根据指挥调度信号做好局部封闭或航道避让的醒目标志，在上下游悬挂安全信号灯、设置备用警笛等，落实专人现场负责维护地面交通组织，确保河道船只提前预判和行驶安全。

3. 进场吊装机械须具有检测合格证，各项安全装置限位保险齐全正常，制动系统灵敏可靠。构件进场及结构吊装前，地面人员必须检查索具、夹具、吊环等是否符合要求，起吊作业人员必须持证上岗，吊装前组织司机驾驶员和地面指挥人员按照设计吊装工艺，复核节段吊装重量和浮吊站位、起吊角度等匹配程度。构件节段要先经试吊，确认起吊平稳可靠后，才能继续起吊。起吊动作以缓慢速度进行，严禁同时进行两个动作。

六、施工监控内容

施工监控的内容主要包括线形监控、应力应变监控、索力监控、拱脚水平位移监控、支撑反力监测、温度监测等几个方面。

（一）线形监控

线形监控包括拱轴线形监控、纵横梁线形监控。上部结构的施工是拱桥施工的关键阶段，需要进行大量的施工测量及监控测量。为确保施工监控测量的精度达到

各项施工组织要求，在施工测量控制网的基础上，根据节段构件几何尺寸及轴线参数，进行局部控制网优化处理。

（二）应力应变监测

拱肋线形对其受力有重大影响，过大的应变偏差会严重破坏节段构件的安全度，造成桥梁结构整体失稳。在拱肋拼装前，在拱肋各节段分别做上标记，在拼装及合拢时实时监测并调整拱肋线形，与设计目标的偏差不得超过允许值。合拢结束后，应监测测量裸拱线形，确保拱肋内部应力应变控制在设计范围内。

（三）拱脚水平位移

桥梁施工荷载及张拉水平拉索会引起两拱脚的水平位移。为了防止拱脚过大的位移对拱肋内力、拱轴线的影 响，即时调整水平拉索张拉顺序、张拉力和加载程序。为保证施工安全，须在施工各阶段监测拱脚位移的变化。

（四）吊杆

吊杆应力是下承式系杆拱桥施工过程中最重要的监测指标之一，通过张拉吊杆来调整拱肋与系梁的受力和变形。在吊杆张拉过程中，会产生吊杆力的耦合，张拉某吊杆后，其余吊杆应力会发生不同程度的迅速变化。在施工监控时每根吊杆均需设置测点，通过每根吊杆测点准确把握吊杆应力变化指标。

（五）系杆

系杆作为平衡拱脚水平推力的构件，是简支梁拱组合式桥梁形成静定结构的重要组成部分。为保证拱肋及纵梁内应力分布处于最佳状态，施工时应应对系杆拉力及变形量进行过程监控，使系杆应力应变满足设计要求。

（六）温度监测

温度监测分为环境温度监测和结构温度监测两部分。结构温度监测包括结构不同构件不同位置的温度值、拱肋内外温差、系梁内外温差等，需要在结构内埋设温度测点，布置与应力测点布置基本相同。

七、结语

本文通过详细论述跨航道下承式系杆钢箱拱桥上部结构制作安装技术，施工过程中严格控制吊装质量和安全要点，并适时动态开展施工过程监控，对同类型桥梁的施工组织具有重要的参考价值。采用支架法分节段吊装拼接，在水中设置临时墩，逐节段吊装于预拼支架上焊接成型，施工组织简单方便，现场作业安全可靠，对航道通航影响较小，为今后下承式系杆钢箱拱桥施工，提供一种行之有效的解决方案。

参考文献

- [1] 侯立智. 下承式钢管混凝土系杆拱桥上部结构施工质量 控制方法[J]. 现代交通技术, 2008, (12): 121-123.
- [2] 陈朗, 陈必玉. 大跨径下承式钢管系杆拱桥无支架整体拆除施工工艺[J]. 住宅与房地产, 2016(3): 183+197.
- [3] 张义贵. 下承式钢管混凝土三肋拱桥刚性系杆研究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(8): 114-116.