

# 复杂地形下大跨度弧形钢箱梁桥施工技术研究与應用

江东鹏 陈定钧

1. 广州开发区财政投资建设项目管理中心; 2. 广州机施建设集团有限公司

**摘要:** 随着城市不断发展, 钢箱梁桥发展可以解决因城市市政道路、建筑群越来越密集所带来的施工场地有限的问题, 因此, 对于钢箱梁的安装技术要求更高。对于一般的钢箱梁安装采用工厂制作现场安装技术, 搭设支撑胎架作为临时支撑系统, 焊接连接固定后拆除。然而, 大跨度弧形钢箱梁生产精度控制难以保证, 同时在复杂地形下的大跨度弧形钢箱梁安装所用的支撑胎架设计及定位需要考虑吊车的工作荷载和安装场地的影响, 对于整个钢箱梁吊装的地基承载能力有着更高的要求, 也要求更加安全的安装技术和焊接的精度。所以, 本文结合工程实际案例研究复杂地形下大跨度弧形钢箱梁桥施工时的生产精度控制、支撑胎架设计、拆分分段、分段节点的搭接、地基承载能力以及对胎架稳定性的设计校核等, 对于保证钢箱梁施工具有重要的意义。

**关键词:** 复杂地形; 大跨度; 弧形结构; 钢箱梁桥; 吊装

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2024. 18. 056

## 一、项目背景

本项目新建的跨线桥需斜向跨越三层现有构筑物, 一层为既有隔墙路, 二层为输油管线群及其保护箱涵, 三层为码头四路桥。主桥上部结构采用钢-混凝土叠合连续梁, 钢箱梁总长度148m, 钢箱梁跨径组合为(35+64+49)m, 桥宽13.5m, 单箱三室型断面。跨线桥钢箱梁施工跨度较大且需跨越现状桥梁以及输油管线群, 施工场地极其复杂, 受到现状桥梁、现状箱涵、周边输油管线群的影响, 支撑胎架搭设定位困难, 吊装空间位置狭窄。本技术以西区隔墙路(西出口)改造工程总承包为依托, 对大跨弧形钢箱梁分段拆分技术、钢箱梁快拆支撑胎架设计及安装技术、钢箱梁各节段间对接技术、大跨度弧形主钢箱梁吊装技术、钢箱梁桥翼缘板吊装技术等一系列技术开展关键技术研究。



图 1.1 钢箱梁桥施工难点图

## 二、施工特点与难点

(1) 跨线桥斜向跨越三层现有构筑物(输油管线群及箱涵、旧桥、隔墙路), 跨度大, 施工场地极其复

杂;

(2) 钢箱梁纵向跨度大、弧度大, 生产制造精度难以控制。

(3) 64米弧形钢箱梁桥安装施工技术要求高, 且安装精度难以控制。

## 三、技术创新点

本技术研究了复杂地形下大跨度弧形钢箱梁桥施工关键技术, 主要技术创新点如下:

(1) 针对复杂地形及既有构筑物, 优化大跨度弧形钢箱梁分块加工安装方式; 深化了弧形钢箱梁分块对接节点设计, 采用企口耳板、定位板等装置, 提高了安装的精度;

(2) 因地制宜设计一种搭设于既有构筑物上的可拆除、可调平钢箱梁支撑胎架, 解决施工场地受限问题;

(3) 结合大跨度弧形钢箱梁分段拆分、生产加工、胎架安装与拆除、吊装与焊接、变形监测、面层施工等工序, 形成一套大跨度弧形钢箱梁生产及安装施工工艺。

本研究基于复杂地形下大跨度弧形钢箱梁桥施工关键技术能有效地解决当前类似工程施工中的技术缺陷, 有效地提高了大跨度弧形钢箱梁安装施工效率, 保证了施工作业安全, 具有较好的经济效益, 值得在工程中广泛推广应用。

## 四、大跨弧形钢箱梁分段拆分技术

钢箱梁跨线桥采用支架法原位拼装方案。首先在梁底施工分段处搭设梁体拼装支架, 钢箱梁节段从加工厂运至施工现场, 采用汽车吊将梁体节段吊装至拼装支架上, 并将各节段焊接为整体, 主跨检测合格后拆除主梁支架。

钢箱梁跨线桥施工场地现状建筑为旧桥、箱涵, 成正交关系, 旧桥在箱涵上方, 钢箱梁跨线桥同时跨过旧桥和箱涵。通过现场地形及周边环境勘察, 对周边输油管线群、现状旧桥、现状箱涵、原有道路、交通情况等进行情况采集, 开展了钢箱梁分段拆分设计、支撑胎架设计和吊装策划, 对钢箱梁分段拆分考虑因素总结如下:

表 1 钢箱梁分段拆分考虑因素

1	吊装半径: 控制在 25m 范围内	6	现状旧桥: 充分利用
2	吊装重量: 控制在 100t 范围内	7	原有道路: 充分利用
3	支撑胎架: 重点策划, 利用周边环境优势	8	地质情况: 地质好
4	分段拆分: 长度控制在 35m 范围内	9	现状箱涵: 充分利用
5	交通情况: 采取全封闭	10	周边输油管线群: 控制距离

钢箱梁分左右幅桥设计，均为三跨一联钢结构箱梁，箱梁设计断面为单箱三室结构，结合梁体构造和运输条件，通过研究分析钢箱梁桥主梁纵向采用长线法分段、横向分块的方案。

1、钢箱梁桥横向分块

左右幅箱室横向分为五块（2个翼缘板+1个全箱室+2个半箱室），左右幅桥靠近线路中心线的为全箱室结构。

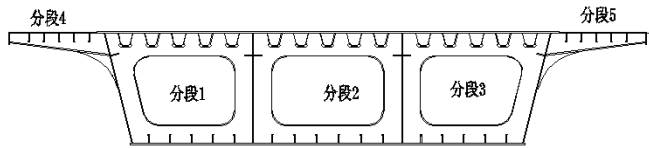


图 4.1 钢箱梁主梁横向划分断面图

2、钢箱梁桥纵向分段

通过分析现状场地情况，64m大跨度弧形钢箱梁段右幅拆分为2个节段，左幅拆分为3个节段。左幅钢箱梁纵向共拆分为7个节段，右幅钢箱梁纵向共拆分为5个节段，最大梁长32.1m。

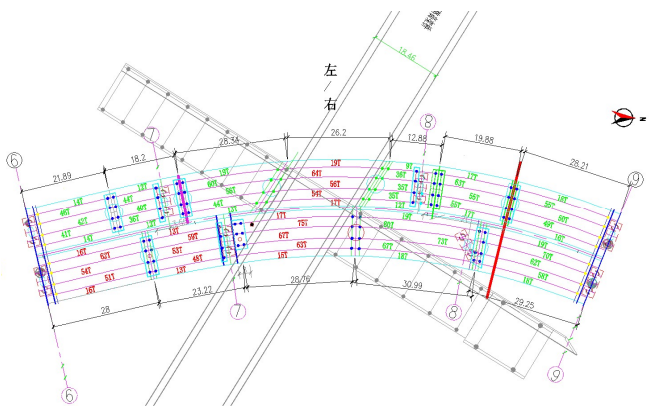


图 4.2 钢箱梁桥分段拆分平面图

五、钢箱梁快拆支撑胎架设计及安装技术

本项目大跨度弧形钢箱梁同时横跨既有旧桥、箱涵，支撑胎架搭设场地受到影响。在已有工程结构安全的前提下，利用已有工程结构和现场工程环境的优势对钢箱梁支撑胎架进行优化设计，利用有限元软件对支撑胎架进行内力分析，设计一种适用于在现状结构上搭设的钢箱梁快拆支撑胎架，在最有利的位置布置胎架，解决施工场地受限问题，保证了钢箱梁安装精度与工期。

(一) 支撑胎架设计

1、支撑胎架设计要点

新型钢箱梁支撑胎架主要由贝雷梁、分配梁、基础墩、钢管立柱、承重主梁和U型槽钢支顶组成。贝雷梁为321型贝雷梁，其设于箱涵的顶部，若干条贝雷梁垂直于箱涵布置，相邻贝雷梁的间距为900mm，分配梁设于贝雷梁的顶部，分配梁设有多个且各分配梁均垂直于贝雷梁设置，分配梁的颈部设有基础墩，其用于设置钢管立柱，钢管立柱设于基础墩上并与基础墩固定连接，相邻钢管立柱之间通过16#槽钢焊接连接，钢管立柱的顶部设有承重主梁，其用于支撑箱梁。

承重主梁的顶部设置可拆除、可调节的U型槽钢支顶，进而组装成可调节的钢箱梁支撑架体系，钢箱梁吊装就位后与U型槽钢支顶焊接固定，确保了钢箱梁的稳定性，同时根据箱梁底部标高来调节U型槽钢支顶的长度，进而解决支撑架不平整的问题，确保了钢箱梁安装精度。钢箱梁支撑架拆除，仅需要将U型槽钢支顶与钢箱梁做切割分离，随后逐步拆除钢箱梁支撑架的各结构，施工方便快捷，有利于提高施工效率。

与现有技术相比，该钢箱梁支撑架的结构可靠、通用性强、不受施工现场条件的限制、安装精度高、施工效率高、使用效果出色。

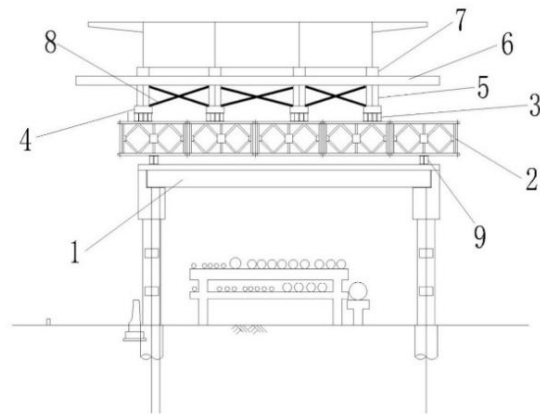


图 5.1 钢箱梁支撑架的正视图



图 5.2 钢箱梁支撑架的施工图

2、设计附图说明

图中，1. 箱涵；11. 钻孔桩基础；12. 预制空心板；13. 排柱盖梁；2. 贝雷梁；3. 分配梁；4. 基础墩；5. 钢管立柱；6. 承重主梁；7. U型槽钢支顶；8. 连接件；9. 垫梁。

(二) 支撑胎架受力验算

1、基础贝雷梁受力验算

(1) 施工荷载分析计算

施工荷载分析以右桥进行计算分析，梁体重量按设计数量进行统计，见表1。

表 1 右幅箱梁荷载数量计算分析表

横梁长度 (m)	1.8		3.6		3.6		1.8
梁跨长度 (m)		31.4		60.4		45.4	
轴线	⑥	⑥-⑦	⑦	⑦-⑧	⑧	⑧-⑨	⑨
梁体重量 (kg)	18579	217909.5	31184.7	419163.4	31194.7	315066.5	18579
线形荷载 (kN/m)	103.2167	69.39792	86.62417	69.39792	86.65194	69.39792	103.2167

(2) 建立受力模型

按照主梁纵向分段进行建立荷载分析模型，为了准确计算出主梁分段支点反力，分段梁段按筒支梁建立模型。

(3) 贝雷梁结构验算

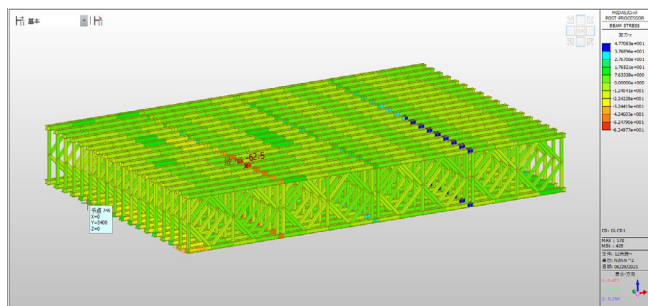


图 5.3 贝雷梁剪应力图 (MPa)

钢支架Q235钢最大组合应力  $\sigma = 62.5 \leq [\sigma] = 120\text{MPa}$ ，满足要求。

(4) 支架立柱反力计算

支架柱底最大反力为1765.9kN

单片空心板梁重为187.4kN

单片梁上部铺装层重量为93.75kN

按照单根桩承受9片主梁传递的荷载静计算单桩承载力。

$$N = 1765.9 + (187.4 + 93.75) \times 9 \times 0.5 = 3031.075\text{kN}$$

设计箱涵结构桩基为摩擦桩，单桩承载力为5000kN，单桩承载力满足要求。

2、支撑胎架受力分析

(1) 建立模型

利用Midas/Civil建立模型，钢梁荷载作用支架上的加载图见图5.4。

(2) 结构验算

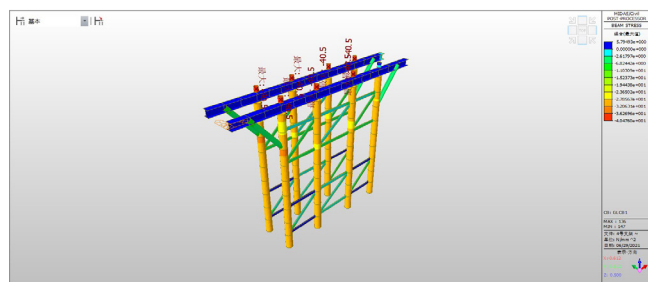


图 5.4 支架整体组合应力图 (MPa)

钢支架Q235钢最大组合应力  $\sigma = 40.5 \leq [\sigma] = 215\text{MPa}$ ，满足要求。

3、结论

(1) 梁体支架稳定性，强度、刚度均符合规范要求。

(2) 支架基础受力满足要求。

(三) 支撑胎架安装及拆除技术

支撑胎架采用汽车吊进行组装。梁体拼装支架最终构件为钢管立柱，支架主要由工字钢承重主梁、贝雷梁、分配梁及钢管支架组成，最大构件为贝雷梁，单组贝雷梁采用10片贝雷片及支撑架组成，重量为3T，现场拼装完毕采用一台50T汽车吊吊装。

1、支撑胎架安装

(1) 吊装前准备工作

安装支架前验收检查预埋件的位置、标高和平整度情况，验收检查钢构件的长度，根据检查情况及时整改，将钢构件和预埋件进行编号。

(2) 贝雷架基础安装

贝雷主梁在施工区(空旷场地)内拼装，下面垫枕木，用吊车将贝雷片逐片吊起，用桁架销子相互连接接长。采用50t汽车吊将贝雷梁分块吊装贝雷梁，吊装完毕后采用900mm花窗固定。

为保证梁的刚度，贝雷、加强弦杆和水平支撑架之间采用接头错位连接，这样可减少由于桁架接头变形产生的主梁位移。连接桁架的所有螺栓螺帽必须拧紧，桁架销子穿到位后必须插好保险销。

(3) 钢管支墩安装

钢管立柱的安装顺序：工厂加工和验收钢管立柱构件(钢管支柱与底板、顶板连接件焊接必须在厂内完成)，将加工好的钢管立柱构件用汽车运至施工现场，吊车安装钢管立柱，钢管支柱截面的十字中心线要与施工支架纵横向中心线重合)，钢管支柱间横向连接(采用16#槽钢焊接)安装完毕后吊装纵梁构件。安装钢管支柱前验收检查预埋件的位置、标高和平整度情况，验收检查钢管立柱的长度焊接质量(焊缝高度不小于8mm)，根据检查情况及时整改。钢管立柱之间联系杆件采用槽钢焊接，加强钢管支墩间的横向稳定性。焊缝施工时满足《钢结构设计规范》GB50017-2017的规定。

(4) 分配梁安装

分配梁的安装顺序：采购工字钢→将工字钢用汽车运至施工现场→吊车安装工字钢施工作业→调整纵梁(施工误差控制在±5mm之内，钢管支柱截面的十字中心线要与施工支架纵横向中心线重合)→调整施工完毕后，经检查施工误差符合设计及验算要求→纵梁工字钢与钢立柱封端钢板采用楔形钢板焊接为一体。

(5) U型槽钢支顶安装

U型槽钢支顶采用人工安装，根据钢箱梁底部标高设计好支顶高度，通过测量放线定位安装在钢箱梁两

侧。

2、支撑胎架拆除

(1) 卸架条件

主梁钢结构安装完毕且焊缝检测合格之后。

(2) 拆除顺序及原则

按照“从中间向两边拆除，从上而下，遵循变形协调和结构安全”的原则分阶段进行支架拆除。

(3) 支架拆除方法

拆除前先用手动千斤顶作为临时支撑，再用氧气乙炔切割设备对支撑立柱进行切割，接着千斤顶卸载抽离，最后用氧气乙炔切割设备对型钢支架体系进行肢解再用50t汽车吊将型钢支架拖出运走。

六、大跨度弧形钢箱梁吊装技术

根据复杂地形下大跨度弧形钢箱梁桥各分段重量、现场吊装环境及梁体构造综合考虑，主梁采用大型汽车吊吊装方案，提出了既有桥梁下预制钢箱梁双机协同吊装施工关键技术。

(一) 钢箱梁安装顺序

(1) 梁体纵向节段安装顺序

根据现场吊装环境情况，先吊装横跨既有桥梁、箱涵段的钢箱梁节段（Z4、Y3），其余各节段按顺序吊装。

(2) 梁体横向节段安装顺序

先安装线路中心线一侧的钢箱梁，再安装中箱，最后安装边箱，最后翼缘。安装顺序见下图。

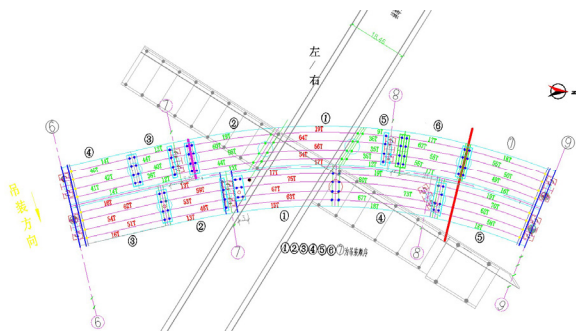


图 6.1 钢箱梁安装顺序平面图

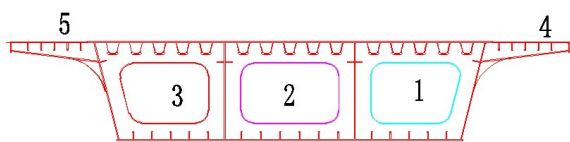


图 6.2 主梁横向节段安装顺序图

(二) 主钢箱梁吊装技术

1、主梁单台汽车吊吊装技术

左幅大跨度弧形钢箱梁Z3节段钢箱梁吊装采用1台450汽车吊（160t配重）吊装方案。汽车吊位于6#~7#墩之间，依次按顺序将Z3-3、Z3-2、Z3-1号梁起吊，并吊装至设计位置。吊装最大半径18m，吊装臂长40m进行分析。吊机额定最大起重量=77\*0.8=65.45t>60t，满足吊装需求。

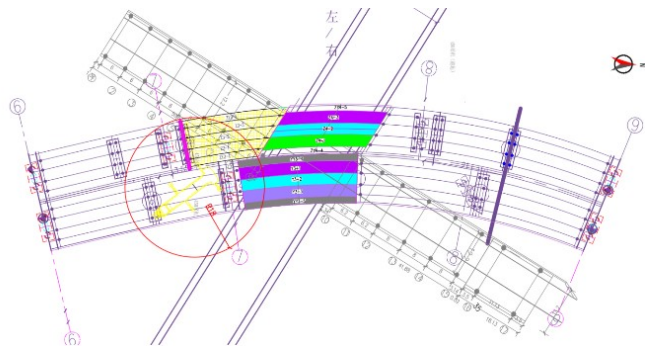


图 6.3 双台汽车吊吊装平面图



图 6.4 双台汽车吊现场吊装图

2、主梁双台汽车吊吊装技术

大跨度弧形钢箱梁Z4节段上跨既有高架桥、箱涵，吊装采用2台450汽车吊（160t配重）吊装方案。首先运梁车将梁段运至既有高架桥。一台汽车吊位于8#墩旁，另一台汽车吊位于既有桥梁左侧，依次按顺序将Z4-1、Z4-2、Z4-3号梁起吊，并吊装至设计位置。

一台吊机吊梁最大半径22m，另外一台最大半径23m，吊装能力按照起吊半径23m，吊装臂长40m进行分析。吊机额定最大起重量之和=(50+48.5)\*0.75=73.9t>64t，满足吊装需求。

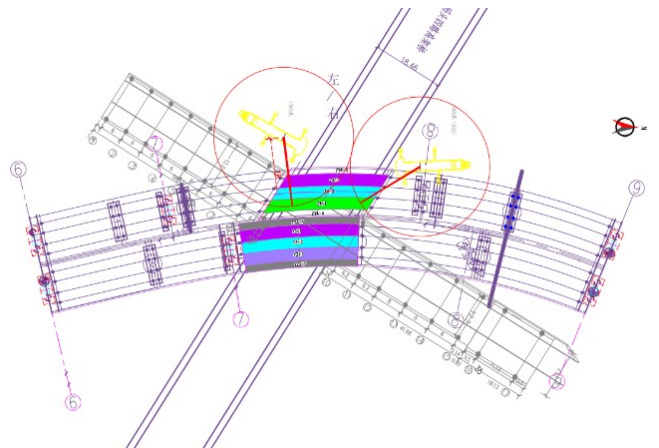


图 6.5 双台汽车吊吊装平面图



图 6.6 双台汽车吊现场吊装图

### (三) 钢箱梁桥翼缘板吊装技术

#### (1) 翼缘板上吊装

钢箱梁桥翼缘板采用桥上吊装，在主钢梁结构吊装焊接加固完成后方可上汽车吊进行翼缘板吊装，提出了在建钢箱梁桥吊装翼缘板施工技术。

翼缘板采用1台50t汽车吊，吊装最大半径8m，吊装臂长12m进行分析。吊机额定最大起重量 $=9.9 \times 0.8 = 7.92\text{t} > 7.8\text{t}$ 。满足吊装需求。

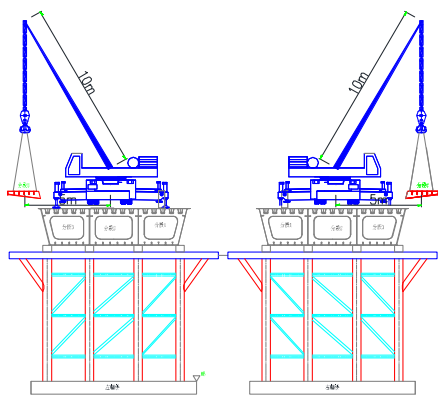


图 6.7 翼缘板吊装图



图 6.8 翼缘板现场吊装图

#### (2) 翼缘板定位措施

翼缘板与钢梁箱梁定位采用工厂组焊式焊接时的匹配件进行固定。

#### (四) 吊装吊耳设计

每段钢梁设置四个吊耳，左右对称布置，同一侧两吊耳间夹角为 $60^\circ$ 。最重钢梁为80t，吊耳耳板平行于隔板放置，外侧增加加劲板。

#### (五) 钢箱梁各节段间对接技术

钢箱梁现场连接采用焊接连接，梁段吊至设计位置后，与前一梁段临时连接，在一合适的温度时段，精确调整焊缝间隙，调平板件错边，间段焊接定位马板，先焊接周边板横向环缝，进行无损探伤，合格后连接纵向嵌补段，检验合格后，对焊缝进行必要的打磨处理，即完成梁段工地连接。

#### (六) 钢箱梁安装定位

梁段吊装时应防止由于梁段位置偏移而产生的横摆，为此每个梁段吊装前应用经纬仪等测量仪器准确标定架设梁段的位置并进行吊具定位试验。通过定位调整后，才能进行梁段起吊。

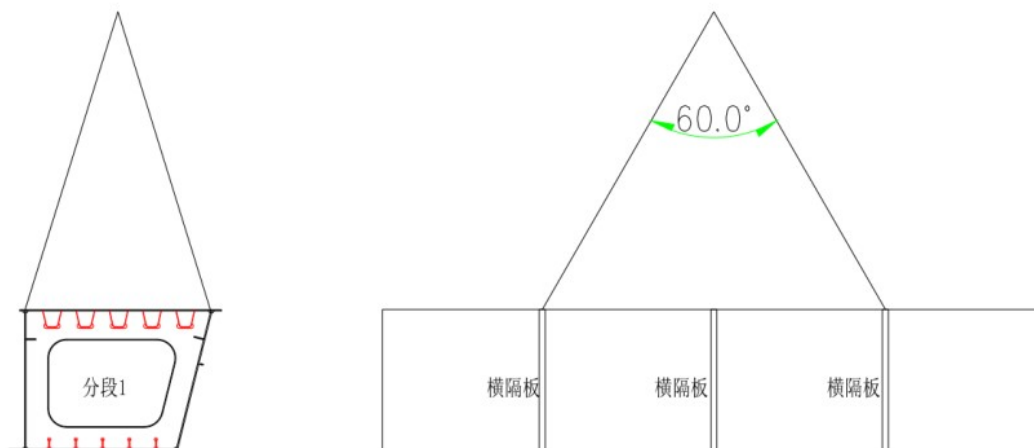


图 6.9 吊耳布置示意图

## 1、钢结构精度控制

### (1) 钢结构轴线控制

①先根据座标在桥墩上准确的放出轴线和桥梁中心线；

②钢结构在装配制作时要放出桥梁中心线和轴线，焊接完后复查各线并打上洋冲标志；

③钢结构在吊装就位时离墩柱约50mm时，精调钢结构，让钢结构上中心线和轴线对应上桥墩上的各线；

④复查各线的重合度，并在墩柱四面安装限位码后吊车缓慢松钩就位，在松钩过程中要随时注意各线的偏移。

### (2) 钢结构标高控制

①根据设计院给出的高程表，准确的计算出各墩柱处各支点的高程；

②钢结构吊装初步定位好，用水平仪复查钢结构顶面高程，如有偏差重新调整。

### (3) 钢结构中心线、前后位置控制

①在墩柱上放出钢结构中心线，在钢梁吊装定位时要对准其中心线；

②严格按照图纸横向加劲肋纵向间距尺寸，以钢结构为基准调整间距。

## 2、钢箱梁测量控制

(1) 开工前，对钢箱梁平、纵设计参数表、支座设计参数等基本数据进行一次全面的校核，弄清平面及立面曲线要素，立面制造线形还应在总体立面线形的基础上叠加各跨的预拱度。安装钢箱梁之前，把每一段梁段轴线尺寸和图纸设计的线形投影在支撑体系上。

(2) 钢箱梁梁段拼装完毕，应对钢箱梁进行24小时整体沉降观测，沉降量符合设计和规范要求后方可进行焊接。

(3) 钢箱梁梁段安装焊接及桥面上临时荷载都会对高程产生影响，因此安装时应考虑所造成的标高变化。钢箱梁焊接完毕，再对钢箱梁进行观测，并做好记录。

(4) 钢箱梁梁段整体焊接完毕经检查合格，整体卸载后，拆除支撑体系，使钢箱梁处于正常状态，24小时后，对桥梁支墩进行沉降观测，并做好记录，与以前的观测记录进行比较，检查是否符合设计及规范要求。

## 3、钢箱梁梁段测量要求

(1) 钢梁吊装前，测量人员提前在临时支撑架顶部放出钢梁边线及中心线，便于钢梁吊装定位；同时复核临时支架顶部高程（即钢梁底板高程）是否准确，如误差超过规范要求，及时进行调整，以免耽误钢梁吊装。

(2) 钢梁每拼装完毕一节时，测量人员对安装完

毕的钢梁顶板进行十字测量放线，同时进行高程测量，复核钢梁平面方向和垂直方向是否安装正确，如误差超过规范要求，及时进行调整。

## 4、拼装梁体支架监控

在每个基础钢管立柱下部位置设置支架监控沉降观测点，横桥向布置4个监测断面，记录梁体拼装前、每节段梁体拼装、主桥桥面板后的支架基础标高。测量时尽量避开阳光直射，减少温度测量误差，施工过程中内2小时观测一次，连续12次以上，并且各测点沉降量平均值小于1mm，视为支架预压稳定，并做好现场详细原始记录。

## 七、总结

在城市市政道路不断发展，钢箱梁的应用可以解决因城市市政道路、建构筑物越来越密集所带来的施工场地有限的问题。对于一般的钢箱梁安装采用工厂制作现场安装技术，搭设支撑胎架作为临时支撑系统，焊接连接固定后拆除。本文研究针对大跨度弧形钢箱梁进行分段拆分，解决了钢箱梁分段拆分、支撑胎架定位困难问题；利用空间任意弯曲箱形构件自动生成软件，自动生成弯曲箱形实体模型，对弧形钢箱梁进行深化设计，解决生产加工精度难以控制问题；在保证已有工程结构安全的前提下，利用已有工程结构和现场工程环境的优势对钢箱梁支撑胎架进行优化设计，利用有限元软件对支撑胎架进行内力分析，设计一种适用于在现状结构上搭设的钢箱梁快拆支撑胎架，在最有利的位置布置胎架，解决施工场地受限问题，保证了钢箱梁安装精度与工期。同时，提出大跨弧形钢箱梁拆分方式，结合钢箱梁拆分、吊装与焊接、胎架安装与拆除、变形监测、面层施工等工序，提出一套复杂地形下大跨度弧形钢箱梁桥施工关键技术。随着城市市政道路的进一步发展，本技术将会得到更多的应用，具有极大的工程应用价值。

## 参考文献

[1] 翟相飞. 大跨度钢箱梁跨河安装技术研究[J]. 市政技术, 2022, 40(05): 40-44.

[2] 董云飞. 大跨度钢箱梁跨既有高速公路吊装技术[J]. 建筑机械, 2022(05): 107-109.

[3] 蒋国明, 师哲, 黄伟. 大跨度钢箱梁加工制作关键技术[J]. 山西建筑, 2021, 47(23): 114-116.

[4] 周灿, 曹凯中, 张彪. 大跨度钢箱梁分段安装曲线线形控制方法研究[J]. 江苏建筑, 2020(05): 64-65.

[5] 张菲. 城市大跨度钢箱梁制作和安装技术的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(09): 166-167.

[6] 颜世健. 高速公路大跨度钢箱梁整体吊装施工技术[J]. 城市住宅, 2020, 27(03): 217-218.