

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112323121996

文章编号:1674-599X(2023)06-0093-08

引用格式:刘宇涛,王达,徐文波.钢箱拱线形控制与误差调整方法[J].交通科学与工程,2023,39(6):93-100.

Citation: LIU Yutao, WANG DA, XU Wenbo. Alignment control and error adjustment method of steel box arch[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6):93-100.

钢箱拱线形控制与误差调整方法

刘宇涛^{1,4},王达^{1,2},徐文波³

- (1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;
- 2.中南林业科技大学 土木工程学院,湖南 长沙 410004;
- 3.中交一公局集团第四工程有限公司,广西 南宁 530033;
- 4.中建五局第三建设有限公司,湖南 长沙 410004)

摘 要:针对中承式系杆拱施工中钢箱拱线形控制与误差调整问题,以广东省茂名市清福港大桥这座中承式系杆拱桥为研究背景,对其支架设计的位置与荷载控制进行研究,并根据现场测算结果进行优化和调整。对安装过程中里程和标高的误差,提出一种用焊缝分阶段调节线形的方法。研究表明:该误差调整方法能够保证桥梁线形平顺,能较好地控制成拱的内力状态。该研究可为采用类似施工方法的拱桥线形控制提供参考。

关键词:钢箱拱;先拱后梁;支架设计;线形调节;施工控制

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

Alignment control and error adjustment method of steel box arch

LIU Yutao^{1,4}, WANG DA^{1,2}, XU Wenbo³

- (1. School of civil engineering, Changsha University of Science & technology, Changsha 410114, China;
2. School of civil engineering, Central South University of forestry and technology, Changsha 410004, China;
3. The Fourth Engineering Co., Ltd of CCCC First Highway Engineering Group, Nanning 530033, China;
4. The Third Construction Co., Ltd. of China Construction the Fifth Engineering Bureau, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to solve the problem of line control and error adjustment of steel box arch in the construction of medium-bearing tied arch, Qingfu Port Bridge in Maoming City, Guangdong Province, which is a medium-bearing tied arch bridge, is taken as the research background, and the position control and load control of its bracket design are studied, and optimised and adjusted according to the results of on-site calculations. For the error of mileage and elevation during the installation process, a method of adjusting the line shape in stages with welds is proposed. The research results show that the error adjustment method can ensure the smoothness of the bridge line and better control the state of the internal force of the formed arch. This study can provide a reference for the linear control of arch bridges with similar construction methods.

Key words: steel box arch; arch before beam; support design; linear adjustment; construction control

收稿日期:2021-11-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278235)

作者简介:刘宇涛(1996—),男,长沙理工大学硕士生。Email:1076151918@qq.com。

随着超静定结构分析理论的发展以及相关新工艺的应用,系杆拱桥以其优美的线形,独特的外观吸引着设计者。与其他拱桥不同的是,系杆拱的自平衡特性不需要地基承受沉重承载力,这也使得其固结部位传力情况尤为复杂。王明明等^[1-3]利用有限元软件对杆系整体受力情况做了详尽的分析与讨论,并研究了影响该结构稳定性的主要参数。针对不同类型的中承式系杆拱,林飞等^[4]对比了内倾式、平行式、外倾式中承式系杆拱的受力、稳定特征,对不同类型的中承式系杆拱的特点与选择进行了分析。曹海顺等^[5-6]以一座五跨连续中承式拱桥为实例,研究了空间异形拱在保持独特造型的情况下,借助其独有的加劲梁与三角区体系来平衡主拱、次拱所产生水平力的方法。

中承式拱桥外观形态多样,结构受力体系也不同。曹海顺等^[5]将目前已建的中承式系杆拱桥分成飞燕式拱桥、梁拱组合体系、三角刚架拱桥三类。其中,飞燕式拱桥整体造型特点是:主跨为中承式,边跨为两上承式半拱,在两端边拱间设置水平向系杆以平衡主墩承受的水平推力,拱肋构成自锚体系。该种拱桥因其外形似飞燕而得名,造型优美,受力情况简单。梁拱组合体系的特点是:桥梁下面的支撑结构一般由Y形墩构成。三角刚架拱桥的特点是:其主墩为三角刚架,为平衡其主跨的重量,该桥必须在后斜腿处延伸一跨简支梁来压重^[7]。

主拱的线形是影响全桥受力性能的关键因素之一^[8-11]。尤其当拱肋的安装采取逐段焊接拼装的方式时,保证最终线形达到设计状态是设计者与施工人员面临的最重要问题之一。近年来,许多学者对于桥型线形控制进行了研究。姚国文等^[12]考虑了切线位移对每一节拱肋吊装的影响,保证线形在误差范围内调整索力使得整体应力满足设计要求,并给出了优化索力的方法。李朝奎等^[13]对箱型拱线形提出了通过计算机预先模拟拼装过程,发现误差并及时纠偏的方法,避免了在实际安装过程中出现较大误差时,强行改变受力状态的情况的发生。蒋宗全等^[14]介绍了在钢箱拱桥的搭设中采用合适的机械设备及在吊装过程中采用合适的支架进行桥梁线形控制的方法。

钢箱拱的拼装涉及到三种线形。姚昌荣等^[15]提出,在考虑施工因素的情况下,为保证线形,施工

需要设定预抬值。王亚维^[16]以成贵铁路贵州鸭池河特大桥为工程背景,针对该桥结构特点和地质条件,对主拱肋采用分节段工厂制造,在预拼场内组拼成节段,利用大型缆索吊机进行扣挂法悬臂拼装的方式,顺利完成了精确合龙。

钢拱肋的安装,应从工期、安全性、设备设施投入、经济合理性等方面进行系统比较,最终选择最合适的方案^[17-18]。本研究提出了一种用焊缝分阶段调节桥梁线形的方法,可为类似钢拱桥的施工误差调整与线形控制提供参考。

1 工程概况

广东省茂名市的清福港大桥位于广东省博贺湾大桥与水东湾大桥之间,属于广东省滨海旅游公路茂名段,跨径布置为50+120+50 m,总长220 m。该桥为中承式系杆拱桥。该桥的桥型布置如图1所示。

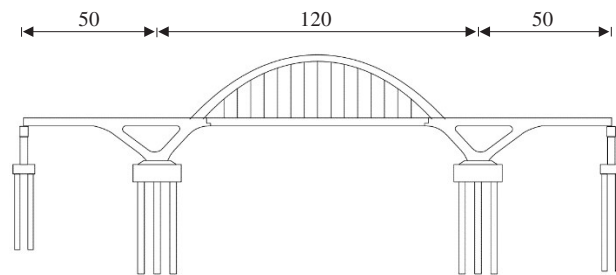


图1 桥型布置(单位:m)

Fig. 1 Layout of bridge (unit:m)

该桥是一座典型的三角刚架拱桥,其主拱结构为钢箱拱,拱轴线跨度为90.0 m,矢高为22.5 m,采用长为1.5 m的悬链线作为拱轴线。拱肋采用矩形截面,宽度为2.0 m,高度由拱脚处的3.6 m线性渐变至拱顶处的2.4 m。

该桥的主梁与前、后斜腿刚接,形成三角刚架,并在前腿横梁处设置牛腿(伸缩缝),使边中跨主梁断开。前、后斜腿采用钢筋混凝土结构,边、中跨主梁采用预应力混凝土结构。中跨主梁为带吊杆支承的简支挂孔,一部分荷载通过吊杆传递至拱肋,一部分荷载通过支座传递至三角刚架,拱肋的水平推力通过水平系杆平衡,整桥处于自平衡状态。

拱肋共分为9个节段,其中,S1为钢混结合段,S2~S4为标准段,S5为合龙段。节段最大重量为67.5 t,具体见表1。

表1 拱肋节段重量表

Table 1 Weight of arch rib segments

分段	长度/m	数量	单节重量/t	累计重量/t
S1	9.487	4	58.200	232.897
S2	11.504	4	57.963	231.854
S3	11.473	4	48.793	195.173
S4	15.865	4	67.413	269.650
S5	15.430	2	60.763	121.527

2 安装关键控制点

目前,关于钢拱肋的安装一般有三种施工方案:

1)分段吊装:分段吊装是拱肋施工中最为常见的方案,分段吊装又分别以支架法和斜拉扣索法配套缆索吊机;

2)整体(或大节段)提升:该方法一般是为了减少桥梁施工对航运和周围生态环境的影响;

3)竖向转体:该法施工成本巨大,一般仅在地质条件极差的地区使用。

广东省茂名市的清福港大桥拱肋跨度为90 m,拱肋下面是栈桥平台,该平台可为支架搭设留出充足空间。若采用搭设支架的施工方法,则可节省工期,且操作简单、误差较小。因此,从工期、安全性、人员与设备设施投入等方面考虑,施工方最终采用分段吊装,并用落地支架支承组焊的总体方案。

该桥主桥整体采用“先拱后梁”施工顺序,使主拱架搭设在施工栈桥上。其支架高度较大,故其位置控制、荷载选取均存在较大困难。在支架搭设之前,需通过Midas Civil 有限元软件,建立拱肋支架模型,分析支架的强度、刚度及稳定性,保证桥梁整体

应力分布均匀,并需结合实际工程,对支架方案进行计算和优化^[19]。

钢箱拱安装的阶段要经历定位、连接、受力转换和接缝焊接4个过程。在这些过程中,施工容易出现4种类型的问题:

1)节段空间定位不准;

2)采用连接夹板进行临时连接时,夹板的张口状态影响对接;

3)在受力转换阶段,节段重量由支架承受,支架变形可能会引起焊缝增大;

4)焊缝阶段受到受力转换阶段的影响,在焊缝接口处产生较大的弯矩和剪力^[20]。

支架拆除后的主拱线形是影响全桥受力性能的关键因素之一。施工控制中常涉及到三种线形:

1)制造线形。制造线形一般是在设计线形时,将恒载与50%倍活载所引起的下挠值作为设计预拱度,该设计预拱度在出厂前就已经加工完成;

2)设计成拱线形。该线形是桥梁在拱肋安装完成,拆除支架后受自重作用一种状态,应保证其与一次落架成拱线形一致;

3)施工控制线形。为在拆除支架后达到设计成拱线形,在施工过程中必须考虑施工因素,考虑未安装节段对已安装节段的影响及支架变形,给出给出施工控制线形。

在施工过程中,因安装、温度、测量等因素,理想状态结构与实际状态结构之间往往存在误差。为了尽可能减小误差,该桥建立了针对钢箱拱全过程施工控制体系。对于施工过程中不可避免出现的误差,在保证线形平顺的前提下,通过设置焊缝的调整量,分阶段调节线形,达到最终控制拱肋线形误差的目的^[21-22]。

3 钢箱拱吊装及支架计算分析

3.1 钢箱拱吊装工艺

根据钢拱的自身重量及现场吊装的工作半径及吊装高度,该工程钢拱采用两台180 t履带吊进行吊装作业。该桥梁主拱分为9个节段,如图2所示。该桥梁由两侧向中间进行分段吊装,吊装顺序为S1→S2→S3→S4→S5,最重段S4节段为80 t(含副拱重量),S2~S5段采用两台履带吊双机抬吊,称重为

180 t的履带吊起重量为52.5 t的节段,满足吊装要求。钢构件通过平板车转运到构件车停放区,通过两台履带吊原地卸货,之后进行加劲板的安装和开设通气孔。在完成这些步骤后,构件两头分别设置牵引绳,准备起吊。选用6×37股(1+6+12+18)直径为60.5 mm的钢丝绳,钢丝绳的公称抗拉强度为1 700 MPa,其破断拉力为2 320 kN。

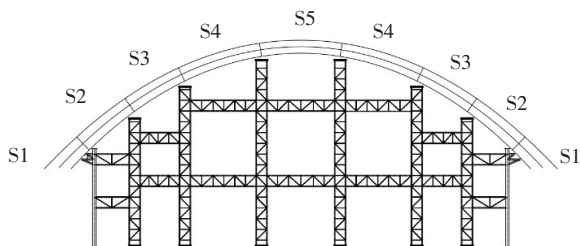


图2 支架布置与拱肋分段

Fig. 2 Support layout and arch rib segmentation

为尽量减少钢拱在吊装过程中产生局部变形,将吊耳设置在距钢拱的全梁长度的1/4处,并要求4条钢丝绳同时起吊。

3.2 支架体系总体设计

拱架作为搭设拱肋的支撑结构,在整个施工期间承受拱肋的全部重量,保证结构的稳定性。

本支架为桁架结构。其中,竖直杆采用4根直径为180 mm,壁厚为8 mm的钢管柱;横、腹杆采用直径为76 mm,壁厚为5 mm的钢管;材质均为Q235。为了保证相邻桁架之间的稳定,竖向受力支架之间采用水平桁架进行侧向支撑。支架上方垫梁采用HW400×300×12×12型钢,材质为Q345。根据拱肋节段的划分,顺桥向设置8组钢拱架。为保证拱肋支架的顺桥向稳定性,在中间设置了纵向系梁。该立面布置情况如图3所示。

同时,为了拱肋节段定位准确,在拱肋节段端头支架顶座上设置两个小立柱,焊接在支架顶座上,小立柱按照放样高程进行精准放样,小立柱上设置一个横向限位块,防止钢拱肋在安装过程中出现侧向位移,通过增加、调平薄钢板或者割除部分小立柱来调节高程微量。

在拱节段在吊装过程中,为减小对支架的横向推力,使支架主要承受竖向压力,故在拱节段底部焊接了三角形的楔形块,以确保在拱节段安装过程中,底部楔形块和支架顶部支座保持水平接

触。支架现场安装如图4所示。该过程如图5所示。

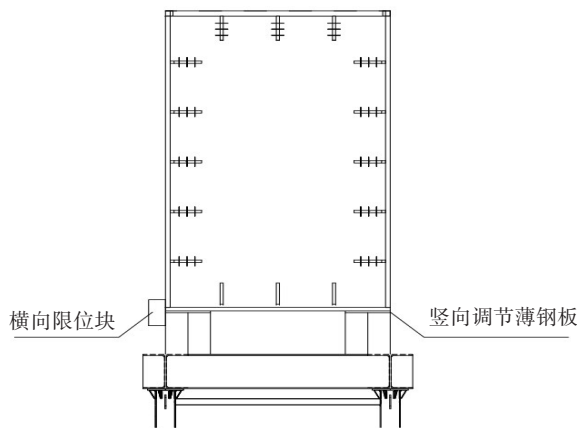


图3 支撑断面

Fig. 3 Cross section of support



图4 现场支架安装

Fig. 4 Field support installation

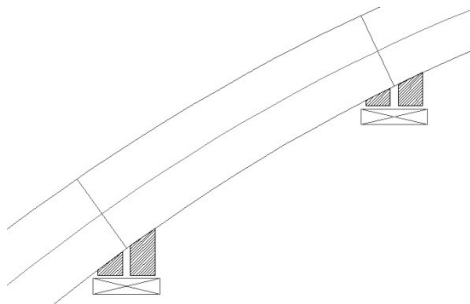


图5 拱肋安装支座示意

Fig. 5 Diagram of arch rib installation support

3.3 支架系统计算分析

为保证桥梁整体应力分布均匀,需要分析该桥梁支架的强度、刚度以及稳定性,并对支架方案进行验算和优化。采用Midas Civil 2020 有限元软件,

对该桥梁建立三维有限元模型。在该模型中,除斜腹杆使用桁架单元进行模拟,其余部分全部采用梁单元进行模拟。根据支架系统各杆件截面特点,选用了不同的截面形式。该三维有限元模型如图 6 所示。

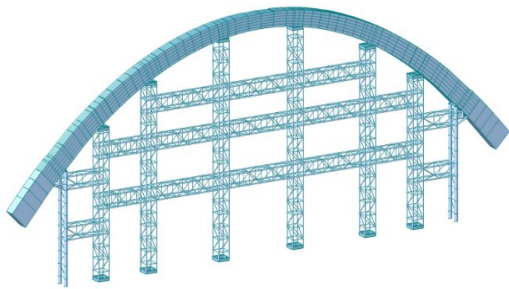


图 6 计算模型

Fig. 6 calculation model

在该三维有限元模型中,设置边界条件:

- 1) 钢管临时支墩墩底与拱脚均采用固结约束;
- 2) 桩顶垫梁工字钢与钢箱拱支撑点之间采用刚度较大的弹性连接;
- 3) 桩顶垫梁工字钢按简支考虑;
- 4) 钢管桩与腹杆连接采用共节点的方式。

荷载取值:

- 1) 钢拱自重由程序自动设置,温度荷载考虑整体升、降温情况,风荷载以钢箱拱结构顶部的风速进行计算,风压取为 0.83 kPa;
- 2) 支架及主拱的风荷载按照倒三角形的形式分布。由于主拱及支架的结构形式与风荷载的分布均较复杂,在参照这些计算结果的基础上,按照主拱承受 2.00 kN/m、迎风面单侧支架承受 0.05 kN/m 的大小考虑风荷载。

钢箱拱拼装按 9 个阶段进行拼装,计算结果见表 2。

表 2 各工况下结构计算结果

Table 2 Structural calculation results under various working conditions

工况	支架应力/ MPa	横腹杆 应力/ MPa	立柱变形/ mm	横腹杆 变形/ mm
S1 左侧吊装	-12.2	-4.6	1.298	1.290

表 2 (续)

工况	支架应力/ MPa	横腹杆 应力/ MPa	立柱变形/ mm	横腹杆 变形/ mm
S1 右侧吊装	-11.7	-4.7	1.290	1.290
S2 左侧吊装	-32.8	-5.7	1.562	1.324
S2 右侧吊装	-35.4	-6.6	1.501	1.276
S3 左侧吊装	-52.2	-10.7	2.665	2.394
S3 右侧吊装	-63.1	-11.2	2.512	2.197
S4 左侧吊装	-86.7	-17.7	4.788	4.396
S4 右侧吊装	-95.9	-15.7	4.717	4.273
S5 吊装	-87.3	-15.4	5.666	4.759

该桥梁支架采用 Q235B 钢。《钢结构设计标准》(GB50017—2017)规定:Q235 钢的容许弯曲应力 f 为 215 MPa。由表 2 可知,该桥梁支架的最大应力为 σ 为 95.9 MPa,该值小于容许弯曲应力 215 MPa,计算结果表明钢管支架强度可满足施工要求。 Z 向最大变形量为 6 mm,约为支架总高度的 1/5 908,满足《钢结构设计标准》(GB50017—2017)中规定的该值必须小于支架总高度 1/500 的要求。

计算结果表明:在各施工阶段工况下,该桥梁的钢管支架强度、刚度、稳定性验算结果均在 Q235B 材料的设计容许值之内,并具有一定的安全储备。同时,支架竖向变形值也将作为预抬值。

4 线形控制与调整思路及实例分析

4.1 线形控制与调整思路

一般拱桥的设计思路是使主拱尽量承受压力,减少弯矩,充分利用主拱材料的抗压性能。拱桥的受力状态与拱轴线形有着直接的关系,在拱肋吊装阶段,控制好钢拱肋的线形极为重要。

针对拱肋线形控制难的问题,该桥采用安装前模型精确计算、安装过程中实时测量及专门的调控控制管理系统来解决。由于节段分段吊装,重量较

大,且支架支撑在施工栈桥上,高度较大,因此,支架变形将成为影响安装线形的主要因素。该模型对S2~S4节段吊装及合龙的施工过程进行了模拟,得出支架在各个施工阶段的当前变形值,合龙后检查支架总变形值,这两者的差值就是后续施工节段对已安装节段的影响值,由此可采取更精确的施工控制方法。

在进行完安装前的精确计算后,严格对施工过程进行实时测量。当施工中积累的误差超出规范允许范围时,需要对误差进行消除。本研究提出了一种采用焊缝、分阶段调节线形的方法,其基本原理为:将观测控制点设置在各节段前端顶点,为保证节段接洽处平顺,将误差值分多次,利用剩余节段调整。其具体调整措施为:各节段先沿着节段轴线方向加大焊缝宽度,再以拼接节段末端底点为原点进行旋转,最终达到以焊缝来调节控制点高程与里程的目的。

增大焊缝宽度对线形的影响计算表达式为

$$\mathbf{y}_w = w\mathbf{k}_w \quad (1)$$

式中: \mathbf{y}_w 为线形受焊缝宽度的影响向量;

\mathbf{k}_w 为焊缝宽度影响向量;

w 为焊缝宽度。

旋转角度对线形影响的表达式为

$$\mathbf{y}_\alpha = \alpha\mathbf{k}_\alpha \quad (2)$$

式中: \mathbf{y}_α 为线形受旋转角度的影响向量;

\mathbf{k}_α 为旋转角度影响向量; α 为旋转角度。在调整节段数较少的情况下,可尝试用算法或直接通过作图进行计算。

对结构进行调整前,应测量每一节段吊装后的控制点高程、里程,并分别确定高程与里程的误差。将这些误差均匀分布在剩余节段中,以确定各节段调整值,计算并调整焊缝宽度和旋转角度。

当节段较多,难以求得误差精确值时,可采用优化方法,将控制线形误差最小化作为目标函数,求得最优调整值,该目标函数表达式为

$$\min f(w, \alpha) = \sum \left(w\mathbf{k}_w + \alpha\mathbf{k}_\alpha - \frac{\mathbf{y}_e}{n-i} \right)^2 \quad (3)$$

式中: \mathbf{y}_e 为当前节段误差;

$n-i$ 为剩余节段数。

但在实际施工过程中,很难同时控制好里程和标高误差。一般线形调整的要求是:将高程误差控

制在规范要求的 $\pm L/3\ 000$ 内,且该误差最大不得超过50 mm。但该调整要求并没有对控制点的里程误差作出明确指示。

但在实际工程中,控制点里程的误差对拱肋合龙也有着极其重要的意义。本研究采用焊缝分段调节高程的方法,该方法在实施时不仅控制了高程误差,也可以缩小相对里程误差。

该调整示意如图7所示。

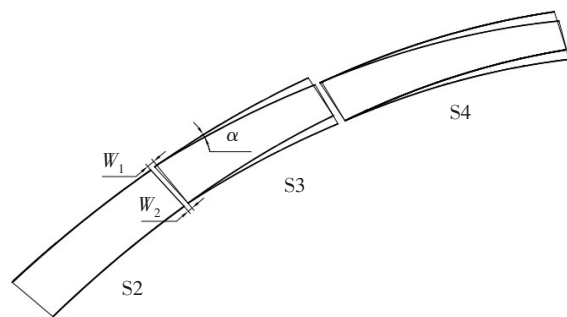


图7 线形调整示意图

Fig. 7 Schematic diagram of alignment adjustment

4.2 线形调整实例分析

在对该桥梁的15#墩S2节段的施工完成后,对其拱肋线形进行测量,得到其线形误差,测量后发现该桥15#墩的S2里程桩号方向偏大3 cm,标高比定位值低1 cm。根据本研究提出的调整方法,计划通过S3、S4节段间的焊缝来调节误差,使S5合龙段能按施工要求控制线形安装。需要说明的是,通过分析发现,因该工程调节数量只有两段,调整值可以通过解方程求出唯一精确解。该桥修正值及计算调整值见表3。

表3 修正值及计算调整值

Table 3 Correction value and calculated adjustment value

位置	修正值/mm	W_1 /mm	W_2 /mm	$\alpha/(^\circ)$
S2~S3	$X=15, Y=-5$	14	10	0.067 6
S3~S4	$X=15, Y=-5$	15	13	0.042 2

在通过采用该方法调节误差后,现场实测数据表明,调节缝的设置有效地实现了误差调整,分阶段修正误差的方法有效地保证了该桥施工过程中的拱肋线形平顺。

5 结论

本研究总结了采用分段吊装及落地支架支撑组焊施工方法,提出主拱在安装过程控制关键点的方法,在安装前采用有限元模型精确计算、在安装过程中实时测量、调控误差的思路,通过分阶段焊缝来调节拱肋线形,通过实例验证了该方法的可行性与有效性。

广东省茂名市清福港大桥的施工控制、分阶段焊缝调节的方法有效控制了拱肋安装的累计误差。该桥于2021年10月4日合龙,最终拱肋合龙高差控制在4 mm,顺利实现了毫米级拱肋合龙。如图8所示。



图8 拱肋合龙

Fig. 8 Arch rib closure

参考文献(References):

- [1] 王明明. 大跨度中承式钢箱混凝土系杆拱桥受力特性分析与研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
WANG Mingming. Structural behavior analysis and research of long-span half-through tied arch bridge with steel box-concrete section [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [2] 张西强, 赵云强, 陈慧. 刚性系杆拱桥更换吊杆的施工监控[J]. 桥梁建设, 2014, 44(5): 118-122.
ZHANG Xiqiang, ZHAO Yunqiang, CHEN Hui. Construction monitoring and control of hanger replacement of a rigid tied arch bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(5): 118-122.
- [3] 陈钊, 王建欣, 王江宇, 等. 钢管混凝土系杆拱桥施工中受力性能及稳定性分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(6): 27-32.
CHEN Fan, WANG Jianxin, WANG Jiangyu, et al. Analysis of mechanical behavior and stability of CFST tied arch bridge in construction process [J]. Bridge Construction, 2012, 42(6): 27-32.
- [4] 林飞. 中承式系杆拱概念设计[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010(10): 192-195.
LIN Fei. Conceptual design of mid through tied arch [J]. Highway Transportation Technology (Applied Technology Edition), 2010, 6(10): 192-195.
- [5] 曹海顺. 五跨连续中承式钢箱拱桥设计[J]. 上海公路, 2018(4): 29-32, 4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2018.04.009.
CAO Haishun. Design of a half-through steel bridge with five spans [J]. Shanghai Highways, 2018(4): 29-32, 4. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2018.04.009.
- [6] 曹海顺. 多跨连续中承式拱桥的系杆设计[J]. 公路交通技术, 2019, 35(2): 80-85. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2019.02.014.
CAO Haishun. Tie bar design of a multi-span continuous half-through arch bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2019, 35(2): 80-85. DOI: 10.13607/j.cnki.gljt.2019.02.014.
- [7] 曹海顺, 鄢芳华. 中承式系杆拱桥结构体系分析[J]. 公路, 2020, 65(2): 125-129.
CAO Haishun, YAN Fanghua. Structural system analysis of half-through tied arch bridge [J]. Highway, 2020, 65(2): 125-129.
- [8] 杨占峰. 大跨径CFST拱桥拱肋安装线形影响因素分析与控制[J]. 公路, 2020, 65(8): 211-215.
YANG Zhanfeng. Analysis and control of influencing factors on arch rib installation alignment of long-span CFST arch bridge [J]. Highway, 2020, 65(8): 211-215.
- [9] 张显明. 钢管砼拱桥拱肋整体竖转吊装线形控制[J]. 公路与汽运, 2010(6): 138-140. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2010.06.039.
ZHANG Xianming. Linear control of integral vertical rotation hoisting of arch rib of concrete filled steel tubular arch bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2010(6): 138-140. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2010.06.039.
- [10] 田军伟. 大跨度钢管砼拱桥拱肋吊装施工控制[J]. 公路与汽运, 2012(1): 164-166. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2012.01.045.
TIAN Junwei. Construction control of arch rib hoisting of long-span concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2012(1): 164-166. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2012.01.045.
- [11] 陈得意, 颜全胜. 基于马尔科夫模型的异形拱肋空间线

- 形预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2018.06.006.
- CHEN Deyi, YAN Quansheng. Prediction research of special-shaped arch bridge arch-rib spatial alignment based on Markov model [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2018.06.006.
- [12] 姚国文, 晁阳, 吴海军, 等. 中承式钢管混凝土劲性骨架拱桥拱肋吊装施工控制[J]. 桥梁建设, 2017, 47(5): 107-111. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.05.019.
- YAO Guowen, CHAO Yang, WU Haijun, et al. Construction control of hoisting and installation of arch rib of a half-through CFST stiff skeleton arch bridge[J]. Bridge Construction, 2017, 47(5): 107-111. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4722.2017.05.019.
- [13] 李朝奎, 邹中权, 龙四春. 箱拱肋预制件线形质量现场检测方法[J]. 公路交通科技, 2001, 18(3): 36-38.
- LI Chaokui, ZOU Zhongquan, LONG Sichun. Dimension test method of prefabricated ribbed arch components[J]. Journal of Highway and Transportation Research Andk Development, 2001, 18(3): 36-38.
- [14] 蒋宗全, 高金亮, 唐继舜, 等. 钢箱系杆拱桥拼装架设线形控制技术[J]. 铁道建筑, 2011, 51(2): 36-38. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2011.02.010.
- JIANG Zongquan, GAO Jinliang, TANG Jishun, et al. Linear control technology of steel box tied arch bridge assembly and erection[J]. Railway Engineering, 2011, 51(2): 36-38. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2011.02.010.
- [15] 姚昌荣, 李亚东. 钢管混凝土拱桥线形控制技术研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(10): 65-69. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2006.10.015.
- YAO Changrong, LI Yadong. Study of alignment control for concrete filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23(10): 65-69. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2006.10.015.
- [16] 王亚维. 成贵铁路贵州鸭池河特大桥主桥拱肋架设施工技术[J]. 桥梁建设, 2017, 47(1): 104-108.
- WANG Yawei. Construction techniques for erection of arch rib of main bridge of Guizhou yachi river bridge on chengdu-Guiyang railway [J]. Bridge Construction, 2017, 47(1): 104-108.
- [17] 修莉. 南沙凤凰三桥主桥钢箱拱肋架设方案比选[J]. 世界桥梁, 2017, 45(4): 15-19, 25.
- XIU Li. Study of erection schemes for main bridge steel box arch ribs of the third Fenghuang bridge in Nansha district, Guangzhou[J]. World Bridges, 2017, 45(4): 15-19, 25.
- [18] 陈代海, 马凤瑞, 仇元森, 等. 高速铁路连续梁拱桥拱肋施工方案对比分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 60-63. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.09.14.
- CHEN Daihai, MA Fengrui, QIU Yuanmiao, et al. Comparative analysis of arch rib construction schemes for high speed railway continuous girder-arch bridge[J]. Railway Engineering, 2017, 57(9): 60-63. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2017.09.14.
- [19] 马祥春. 大跨径钢管混凝土系杆拱桥拱肋支架方案优化研究[J]. 施工技术, 2014, 43(增刊2): 248-251.
- MA Xiangchun. Study on the optimization of scaffold schemes of arch rib of long span CFST tied arch bridge [J]. Construction Technology, 2014, 43(sup 2): 248-251.
- [20] 顾颖, 姚昌荣, 李亚东, 等. 大跨度钢管混凝土拱桥安装线形控制方法研究[J]. 桥梁建设, 2014, 44(1): 107-113.
- GU Ying, YAO Changrong, LI Yadong, et al. Study of alignment control method for installation of arch ribs of long span CFST arch bridge [J]. Bridge Construction, 2014, 44(1): 107-113.
- [21] 李世军. 太原北中环斜跨拱桥钢箱拱安装施工技术[J]. 世界桥梁, 2014, 42(1): 16-21.
- LI Shijun. Construction technique of steel box arch installation for Zhonghuan bridge with skewed Arches in northern Taiyuan[J]. World Bridges, 2014, 42(1): 16-21.
- [22] 刘宇飞, 李传习, 于孟生, 等. 大跨拱桥拱肋拼装温差效应分析及控制方法[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.011.
- LIU Yufei, LI Chuanxi, YU Mengsheng, et al. Analysis and control method of temperature difference effect in arch rib assembly of large span concrete-filled steel tube arch bridge [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 63-69. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.011.

(责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:郭一鹏)