

基于复杂环境下新建铁路大跨度系杆拱桥梁 施工关键技术研究

张建

中铁五局二公司

摘要: 本文以新建甬金铁路溪口特大桥1-140m有碴轨道双线下承式钢管混凝土提篮系杆拱桥为工程背景,对位于狭窄场地复杂环境条件下系杆拱桥施工关键技术进行研究。通过对1-140m系杆拱桥系梁、主拱拱脚节段以及标准段高空吊装、拱肋混凝土灌注及吊杆安装张拉等施工关键工序的技术研究,提出复杂环境下的施工方案,合理确定在狭窄场地的系杆拱桥各关键工序的技术方案并对存在的关键技术进行阐述,可为类似的系杆拱桥梁工程的施工提供参考和借鉴。

关键词: 铁路; 上跨; 高等级公路; 提篮系杆拱桥
【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.05.066

一、引言

系杆拱桥因其结构轻盈、线形美观、跨越能力大,近年来在60~200m跨径范围内具有较强竞争力。其中尼尔森体系钢管混凝土拱桥能提供较大的纵向刚度、因其外部静定、无水平推力性能优越、经济效益好,具有良好的安全、平稳、舒适的性能,从而在铁路跨越高等级公路中得以广泛应用。但在施工场地狭窄等复杂环境下,为了确保高速公路、省道的安全,必须通过合理的支架布置、拱肋高空分段吊装方式以及拱肋混凝土灌注方案从而保证施工期的安全与质量。本文以金甬铁路上跨甬金高速的溪口特大桥为例,分析并研究了复杂的周边环境,提出相应的施工方案及施工关键技术。

二、工程概况

(一) 设计概况

新建宁波至金华铁路为双线 I 级铁路,设计速度160公里/小时。在溪口镇康岭村上跨G1512甬金高速公路和S309省道,夹角为141°,采用1-140m有碴轨道双线下承式钢管混凝土提篮系杆拱桥跨越;甬金高速为双向四车道,设计时速120km/h,高速公路路面至系梁底面11.8米。

溪口特大桥1-140m系杆拱桥长144m,桥面全宽17.8m,梁部3m等高,拱肋矢高28m,拱肋轴线采用二次抛物线。拱肋截面采用哑铃型钢管混凝土等截面,高度 $h=4.0\text{m}$,钢管直径1.3m,壁厚18mm,两钢管之间采用16mm厚的钢板连接。全桥设置两榀拱肋,在横桥向内倾8°形成提篮式样。钢管和腹腔内均填充C50自密实补偿收缩混凝土。

(二) 施工周围复杂环境

溪口特大桥1-140m系杆拱具体周边环境如图1,以铁路桥梁为分界线,左侧上部分为居民村庄、左侧下部为山体与S309的夹心地、左侧上部为剡西江不具备临时施工场地;左侧下部为基本农田,栽种的竹林,地方政府因为没有用地指标不让征地,因此也不具备临时施工

场地;且跨越高速公路只有通过距离系杆拱桥20m处的涵洞,该涵洞是下挖涵洞,仅能过混凝土罐车,运输拱肋钢管的车辆不能通行;综上所述,溪口特大桥1-140m系杆拱桥施工场地狭窄,施工场地严重受限制,施工环境极端复杂。



图1 系杆拱周边环境航拍图

三、总体施工方案

溪口特大桥1-140m系杆拱桥采用“先梁后拱”的施工方法,系梁采用搭设梁柱式贝雷支架分段浇筑施工,钢管拱利用已完梁面作为平台,采用搭设临时支墩法分节对称施工。拱肋合龙后灌注混凝土,安装及张拉系杆,最后进行系梁支架拆除。主要工艺流程:基础处理→搭设支架→系梁模板、钢筋、混凝土及第一批预应力工程施工→梁面搭设支架→钢管拱肋节段安装及焊接→拱肋灌注混凝土→吊杆安装及张拉→第二批预应力张拉压浆施工→桥面施工及二期恒载加载→索力调整及锚头防腐施工→成桥。

四、关键施工方案及技术研究

(一) 系梁施工方案

1. 系梁支架方案研究及确定

系梁支架方案根据桥位处地层及确保公路畅通的需求,仅能采用梁柱式支架进行施工,经与高速公路、高速交警等管理单位沟通,编制并审批通过了交通疏解方案,并拟定了两种梁柱式支架方案,两种方案主要区别在于采用的梁型不同;第一种方案采用常规的贝雷梁(高1.5m),第二种方案采用大桁架(高3m)。为了满足公路通行及施工的可实施性,对支墩进行了专项设计并根据支墩跨距最大25.86m进行midas建模分析,①采用单层常规的贝雷梁不满足要求;双层常规的贝雷梁,经计算最大弯应力259 Mpa (Mn钢允许应力270Mpa)、最大位移28mm,刚度及强度均满足规范要求。②采用大桁架(高3m),经计算最大弯应力285.5 Mpa (允许应

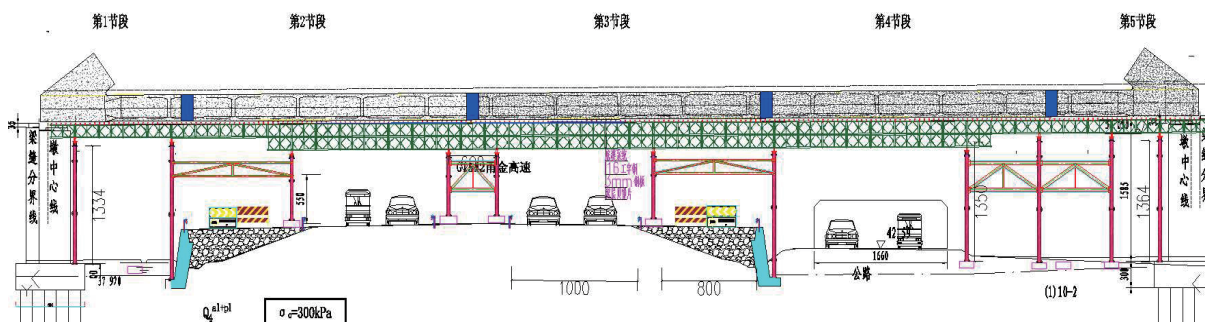


图2 系梁支架及节段浇筑分段示意图

力305Mpa)、最大位移25.999mm,刚度及强度均满足规范要求。鉴于双层常规的贝雷梁施工速度慢、贝雷梁受力不均等不利因数,并且为了推广应用新技术,最终选择大桁架(高3m)的施工方案。

2. 系梁支架搭设及浇筑施工方案

系梁支架搭设采用吊车吊装,从一端向另一端进行,搭设过程中必须考虑施工预拱度和支架弹性变形确定,其中施工预拱度一般图纸已明确,支架弹性变形可以按经验值先施工,待后期预压时变形与经验值不同在进行调整。支架搭设过程中严格按照审批后的方案进行施工。

系杆拱系梁设计分5个节段施工,各节段之间预留2m合龙段,系梁浇筑顺序:1、5节段→2、4节段→3节段→合拢段。其中浇筑1、5节段采用常规的天泵,2、3、4节段及合拢段由于场地狭窄,需要采用72m天泵泵送混凝土,浇筑过程中泵管端部采用绳子进行固定,避免混凝土泵到下方道路造成交通事故;混凝土浇筑前支架、支座、模板、预应力管道及钢筋等工序同一般梁体施工工序,其中系梁两端预埋拱脚钢管及系梁预埋套管在施工前采用BIM建模,复核与预应力管道及钢筋的空间位置关系,如与预应力管道冲突上报设计院进行调整,与钢筋有冲突调整钢筋间距及形状;系梁预埋套管在安装过程中先安装套管后安装吊杆系梁锚块钢筋,并且在混凝土浇筑前对系梁预埋套管的加固措施进行详细检查以及复核套管的空间位置是否与设计相符,如不符必须进行调整。

系梁在合龙前,绑扎好预留钢筋,新旧混凝土面应凿毛、冲洗干净。合龙段段采用C50补偿收缩混凝土一次浇筑完成,合龙混凝土应选择在夜间低温时浇注,注意保湿养护。

(二) 拱肋施工方案及施工工艺

1. 拱肋节段划分

本系杆拱设计拱肋可分为9-11个节段(不含拱脚),实际根据制造、运输、吊装条件等情况拱肋划分为11个节段,节段划分过程中节段接头注意避开吊杆孔、横撑等位置。拱肋钢管在工厂加工以直代曲生产,直线长度不超过2m,加工过程中注意按照图纸进行预拱度的设置;拱肋及横撑制造完成后必须试拼合格后方可出厂。

2. 拱肋安装

(1) 拱肋支架方案

根据拱肋分段情况,在靠近每段拱肋的端部位置设置双柱型钢管支架,单侧拱肋共布置5组立柱,钢管规格为Φ325*8mm,钢管立柱间采用[16a进行联系,支架顶部设置双拼32a工字钢作为承重梁。支架在梁面整体焊接完成后采用汽车吊吊装,到位后与梁面预埋钢板进行焊接,施工中注意支架垂直度的控制。

(2) 拱肋安装方案

拱肋安装分两部分进行,第一部分拱脚钢管的预埋,需要在梁体浇筑混凝土前把拱脚钢管按照设计的三维坐标进行安装并采用20工字钢进行固定,本桥根据现场吊车实际能够做到的站位及吊重经计算采用160t汽车吊在地面把拱脚吊装至设计位置,微调采用千斤顶,调整到位后焊接固定,浇筑混凝土前再次复核拱脚钢管的位置,确保无误后方可浇筑混凝土;第二部分拱肋钢管及横撑的安装,采用从两端拱脚向跨中对称吊装,为加快施工进度减少吊装次数,利用桥面作为拱肋临时拼装场地预先拼装S2、S3以及S4、S5,又因场地狭窄,地面没有吊装拱肋节段的条件,因此吊装方案采用两台吊机在桥面进行吊装作业,根据梁面的宽度、双柱型钢管支架间距以及最大起吊重量计算两台130t汽车吊可满足要求,用1台300t汽车吊将2台130t汽车吊吊至桥面。

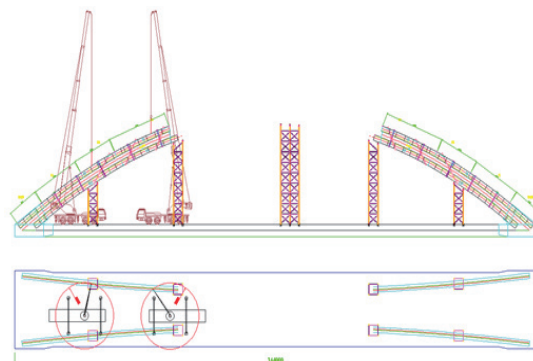


图2 拱肋安装示意图

拱段用桥面工作的吊车直接吊到设计位置附近,用手拉葫芦将钢管沿导向收紧至设计位置,在支架处设置千斤顶进行微调,待坐标满足规范要求后,采用码板临时固定后进行焊接;拱肋安装到位一个节段,在拱肋支架分配梁上用[16槽钢分别在钢管两侧焊接两道竖向支

撑防止钢管移动。K撑要及时安装，只要已安装好的拱肋具备安装K撑时，必须待K撑安装后，进行下一拱肋节段的吊装。

合拢段钢管出厂时需要留够长度，待现场除合拢段以外的拱肋完成后，在低温时段实测合拢段长度加工合拢段钢管；合拢前需确定一天当中气温较低且平稳的时间确定合拢日期；合拢段起吊到位后，在合拢段两端各设置两台50KN手拉葫芦，辅助调整合拢段的线型；在拱肋钢管的对接处设置2台紧线器，用以调整和固定合拢段在顺桥轴线方向的位置。通过收放手拉葫芦和紧线器，精确调整合拢段的各项线型指标，采用码板进行临时定位后焊接，所有焊缝均需要检测合格后方可进行下道工序施工。

3. 拱肋混凝土泵送

(1) 拱肋混凝土泵送方案的研究及确定

拱肋混凝土泵送设计采用两端及两侧拱肋同时对称灌注，考虑现场场地狭窄的实际情况，在地面不具备摆放4台地泵的条件，因此主要考虑地泵放置在梁面，利用天泵把混凝土输送至地泵的方案（系杆拱桥两侧梁体由于系杆拱未张拉，不能施工导致混凝土罐车不能上桥），该方案经研究有以下两种方案：方案1：采用4台地泵以满足拱肋同时对称灌注的要求，但由于场地狭窄，系杆拱桥两端仅能各布置一台天泵，根据混凝土泵的泵送量、拌合站的生产量、自密实混凝土初凝时间以及拱肋需要的灌注的混凝土总方量计算是否在自密实混凝土初凝时间内能够完成混凝土的灌注，经计算在初凝时间内刚好能够完成混凝土灌注，但未考虑灌注过程有可能的风险，如灌车在公路上堵车、泵车损坏、堵管等风险，因此该方案不合适；方案2：把拱肋分成左右两侧灌注，灌注顺序：左侧拱肋上弦管→右侧拱肋上弦管→右侧拱肋下弦管→左侧拱肋下弦管→左川腹板→右侧腹板，灌注过程中每部分均需要对称同步灌注，虽然不符合设计原则，但经过midas建模分析，单侧拱肋混凝土浇筑会使拱肋整体横向偏移11mm，拱脚应力增加至65MPa，风撑应力增加至28.6MPa；拱肋上弦杆第二次浇筑完成后，横向拱肋横向偏移为3mm，拱肋应力53MPa，两侧拱肋应力基本一致，风撑应力减小至18Mpa，结构受力安全。因此拱肋混凝土泵送方案选择方案2。

(2) 拱肋混凝土泵送施工工艺

拱肋混凝土的灌注施工主要采用从低处向高处的泵送顶升法，是拱桥施工最关键的工序，是不可逆的过程，为了确保混凝土灌注的顺利，需要对混凝土的原材料、性能、运输、泵送以及浇筑过程可能出现的问题进行充分研究，并制定施工措施形成适宜本项目的施工方案，现场严格按照方案实施确保混凝土灌注质量；拱肋混凝土泵送施工工艺：混凝土原材料备料→混凝土拌合机及性能测试→混凝土运输→混凝土泵送→灌注完成。其中需要重点加强以下几方面的工作：①混凝土的原料提前备好并检测合格，进场材料确保是同一批确保材料性能稳定。②每车出厂的混凝土必须检测合格，并在施工现场检测合格后才能灌注。③地泵及天泵选用机况较好的并在现场配置有备用设备。④在钢管拱肋拱脚

位置及拱顶与拱脚中间（备用）设置灌注孔，现场浇筑过程中灌注孔加工的工人必须全程在现场确保发生意外时能够及时处理现场事情。

(三) 吊杆施工工艺

(1) 吊杆下料长度确定

由于系杆拱桥梁施工复杂多变，梁体、拱肋制造、安装等不可避免的施工误差，现场实际情况与理论值存在一定偏差，结合成品索的构造、下料时实际温度，我们采用现场实测锚点的间距+10cm作为吊杆的下料长度。

(2) 吊杆安装及张拉

由于受场地限制，吊杆仅能在桥面采用吊车进行安装；吊装前确定好吊杆的编号并与拱肋上预留吊杆孔位置对应，然后吊车用两点起吊把吊杆吊装到拱肋上部，人工牵引吊杆一端穿过拱肋上的预留孔及梁面预留孔，安装锚头调直吊杆；拱肋混凝土强度达到100%以上时，进行吊杆初张拉，待梁体第二次张拉后，吊杆根据设计图进行第二次张拉；最后等梁体二期横载全部加载完成后对吊杆索力进行监测并调整索力，使每根吊杆索力与设计索力一致，偏差值满足规范要求。严格按设计和监控给出的张拉顺序分次进行吊杆张拉，张拉须纵向、横向对称进行。索力调整完成后及时在锚头内部灌注特制黄油防止锈蚀。

五、结论

(1) 通过对1-140m系杆拱系梁支架方案研究及建模计算分析，系梁支架大桁架（高3m）的施工方案与普通贝雷梁对比，可以有效确保施工安全、节约投资及工期并且做到了推广应用新技术的示范工程。

(2) 1-140m系杆拱桥梁施工场地狭窄，通过研究提出了利用已浇筑的系梁梁面作为工作平台的施工方案，在系梁面拼装拱肋节段、吊装安装以及吊杆安装。

(3) 利用midas建模分析计算，优化拱肋灌注方案：左侧拱肋上弦管→右侧拱肋上弦管→右侧拱肋下弦管→左侧拱肋下弦管→左川腹板→右侧腹板，灌注过程中每部分均需要对称同步灌注，虽然不符合设计要求，但结构受力安全，拱肋变形较小并且实测变形小于计算变形值，满足系杆拱线性要求。

(4) 本文对狭窄场地的系杆拱桥梁施工关键技术进行研究，对跨既有高速公路及省道的系杆拱桥的各关键工序的技术方案及关键技术进行阐述，可为类似的系杆拱桥梁工程的施工提供参考和借鉴。

参考文献

- [1] 高波, 钟跃. 高铁140m系杆拱桥先拱后梁法施工关键技术[J]. 中国铁路, 2020. 06: 136-143.
- [2] 王祥国, 邓博, 杨孟刚. 考虑施工阶段的高铁系杆拱桥吊杆张拉优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 808-814.
- [3] 张博. 跨既有高速公路下承式铁路系杆拱桥施工关键技术研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(5): 1491-1494.
- [4] 李艳凤, 于欢, 包龙生. 下承式系杆拱桥施工阶段受力特性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 149-153.