

拱塔斜拉桥设计与施工

冷金荣

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 韩城市太史大街西延伸桥梁建设工程以高架形式连接韩城新城区和象山森林公园,主桥采用拱塔斜拉桥,跨径布置108 m+128 m,索塔采用竖直拱形塔,主梁采用双边箱钢主梁。为保证异形结构的焊接质量,索塔采用“卧式拼装,整体竖直提升转体”的总体施工方案,并创新性地提出了“塔内设支架,边拖行边竖转”的转体方法,可为类似工程提供有益的参考。

关键词: 拱塔斜拉桥;钢梁;钢塔;竖直提升转体施工

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0238-04

Design and Construction of Arch-pylon Cable-stayed Bridge

LENG Jinrong

[Tongji University Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The Hancheng City Taishi Avenue West Extension Bridge Construction Project is to connect the Hancheng New District and Xiangshan Forest Park in an elevated form. The main bridge is an arch-pylon cable-stayed bridge. Its span layout is 108 m + 128 m. The cable pylon is a vertical arch pylon. And the girder is a double-side box steel girder. In order to ensure the welding quality of the special-shaped structure, the overall construction scheme of "horizontal assembly, integrated vertical lifting rotation" is adopted for the cable pylon, and the rotating method of "bracket in pylon and vertical rotation while dragging" is creatively proposed, which can provide a useful reference for similar projects.

Keywords: arch-pylon cable-stayed bridge; steel girder; steel-pylon; vertical-lifting rotation construction

0 引言

为打造生态旅游休闲地,提升城市旅游文化品位,2012年韩城市政府把象山森林公园建设作为十项民生亮点工程,但新城区与象山森林公园间的象山区为川谷台塬,地形起伏很大,是新城区与象山间的天然阻隔,如何实现二者的顺畅衔接,成为迫切需要解决的问题。

现状太史大街是韩城新城区最重要的东西向通道,西端止于巍山路交叉口。太史大街西延伸工程东起巍山路,西至象山森林公园停车场,是联系新城区和象山的纽带。在深入研究了陕西省、韩城市及相关区县有关国民经济和社会发展的要求后,经多方案比选,最终选用全线高架方案穿越象山区^[1]。为满足其交通和景观功能,在梁山路附近布置一座具有景观标志性的斜拉桥。索塔采用曲线优美的拱形塔,远观如龙门巍峨挺拔,与象山风景区自

然风光遥相呼应。

1 工程概况

太史大街是陕西省韩城市主城区规划主干路“六纵十三横”的重要组成部分,太史大街西延伸工程路线全长约1 800 m,西起韩城市规划象山森林公园,向东以高架形式连续上跨侯西铁路、黄韩侯铁路、矿区运煤铁路专用线、G327、梁山路等,终点与现状巍山路平交。跨越现状道路梁山路节点处的主桥采用独塔双索面斜拉桥,如图1所示,跨径布置为108 m+128 m,双向4车道规模,两侧各设置宽度为3 m的慢行道,桥面全宽22.6 m。索塔采用全钢结构拱形塔^[2],主梁采用双边箱钢主梁。

2 技术标准

道路等级:城市主干路,设计时速50 km。

设计荷载:城—A级。

设计安全等级:一级。

抗震设计:基本地震加速度值为0.15g,地震基本烈度为7度,主桥抗震设防类别为甲类,抗震措施

收稿日期: 2024-04-08

作者简介: 冷金荣(1979—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。



图1 拱塔斜拉桥效果图

符合8度区的要求。

设计使用年限:100 a。

3 结构设计

3.1 索塔

主桥索塔采用拱形塔,总高117.5 m,其中桥面以上76.5 m,桥面以下为41 m。索塔为全钢结构,箱型截面,壁板最大厚度35 mm。断面尺寸由拱脚向拱顶逐渐变小,拱脚截面尺寸为6 000 mm(纵桥向)×5 312 mm(横桥向),拱顶截面尺寸为3 500 mm(纵桥向)×4 000 mm(横桥向)。竖向采用板肋加劲,沿拱轴线每隔2 000~3 000 mm设置一道横隔板,最大厚度为25 mm。

索塔与混凝土承台间采用68根直径为75 mm的高强预应力钢棒连接。与传统精轧螺纹钢筋相比,在锚固回缩、疲劳、与混凝土粘结强度等方面有较大的性能提升。为保证钢索塔的耐久性,在塔脚处采用C50混凝土进行包封,包封高度为2 700 mm,如图2所示。

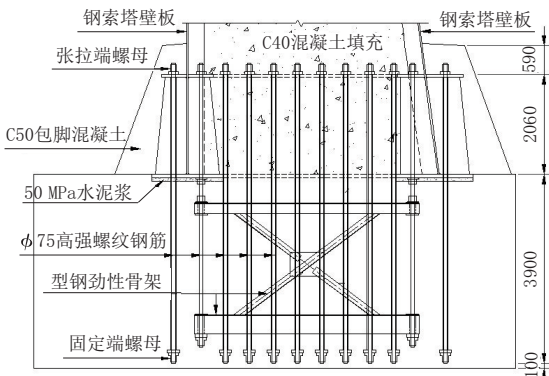


图2 塔脚与承台连接方案(单位:mm)

3.2 主梁

主梁采用双边箱钢主梁,道路中心线处梁高2 500 mm,顶板宽24 600 mm,桥面板厚16 mm。边腹板厚28 mm,内腹板厚16~20 mm,底板最大厚度为32 mm,如图3所示。

主梁腹板采用18 mm×210 mm板式加劲肋。主

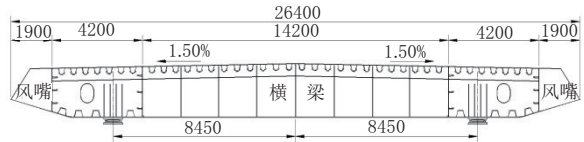


图3 钢主梁横断面(单位:mm)

梁标准节段长为10 m,在锚索位置布置一道主横梁。主横梁之间布置次横梁,主、次横梁间距为3.3 m。

3.3 斜拉索

斜拉索立面采用扇形空间双索面形式。全桥共布置22对索,塔上竖直方向索距为4 m,梁上纵桥向标准索距为10 m,锚跨最后3根索纵向间距为5 m。为减小斜拉索的风振、雨振,在每根斜拉索两端内部设有减震器,在下端距离桥面2 m范围内外包不锈钢管,以保证斜拉索的耐久性。斜拉索采用标准强度为1 670 MPa的环氧涂层拉索体系。

斜拉索与钢主梁的连接采用锚箱型式,斜拉索锚固在锚固梁上,锚固梁焊接在主梁外侧腹板上。斜拉索与钢索塔的连接采用锚固梁式,锚固梁为π形断面。索塔及主梁锚固梁的钢板最大板厚均为40 mm。

3.4 基础

主桥主墩及边墩基础均采用钻孔灌注桩,选取第⑫层卵石层作为桩基持力层。主墩共布置18根直径1.5 m的钻孔灌注桩,桩长45 m,边墩共布置12根直径1.5 m的钻孔灌注桩,桩长47 m。

4 结构计算

4.1 静力计算

4.1.1 计算模型及参数

主桥静力计算采用空间杆系模型,计算模型共1 658个节点,1 570个梁单元。索梁间以刚臂连接,支座采用弹性连接模拟,桩基底部设竖向支承边界,桩身节点按m法设置土弹簧。计算模型主要的荷载(作用)取值如下。

- (1)恒荷载:包括自重、铺装、防撞护栏、附属结构等。
- (2)汽车荷载:4车道城—A级车道荷载。
- (3)基础变位:主墩沉降按20 mm,边墩沉降按10 mm计。
- (4)整体升降温:±30℃。
- (5)桥面温度梯度:桥面钢板升温15℃。
- 索塔温度梯度:索塔单侧±5℃。
- 拉索温差:±10℃。

(6)风荷载:基本风速为28 m/s,工程地点地表类别为B类。

4.1.2 主要计算结果

根据相关规范^[3]的要求,对主桥的强度、刚度和稳定性进行验算。根据结构受力特点,主梁、索塔均按双向受弯的压弯构件进行验算,有效截面宽度和有效截面面积同时考虑了剪力滞和局部稳定影响。

(1)强度验算

运营期在永久作用和可变作用下主梁最大正应力为229.3 MPa,最大剪应力为31.3 MPa,主塔最大正应力为190.8 MPa,最大剪应力为16.4 MPa。

Q355钢材(t 在16~40 mm)的抗拉、抗压及抗弯强度设计值 $f_d=270$ MPa,抗剪强度设计值 $f_{vd}=155$ MPa,因此索塔和主梁的强度均满足规范要求。

(2)刚度验算

汽车荷载的竖向挠度值为150 mm,小于规范容许值 $l/400=320$ mm,因此主梁刚度满足要求。

(3)整体稳定验算

在计入斜拉索垂度的影响的情况下,主桥的弹性屈曲稳定安全系数为30.7,大于规范限值4.0,因此整体稳定性满足要求。

(4)主梁局部验算

主梁局部稳定以最大宽厚比和局部稳定折减系数的形式考虑,因桥面板上设置了钢筋混凝土铺装,无桥面板疲劳问题。因此主梁局部计算包括横梁、支承加劲等。

经计算,主梁横梁最大正应力197.7 MPa,腹板局部正应力为15.3 MPa,均小于规范限值270 MPa。

支承加劲根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTGD 64—2015)第5.3.4条进行验算,其端面局部承压应力55.8 MPa,小于规范限值355 MPa。按短柱计算的压应力为110.3 MPa,小于规范限值270 MPa。

4.2 抗震计算

4.2.1 抗震体系比选

主桥下塔柱高达41 m,根据地震安全性评价报告,E1、E2地震作用的地面地震动峰值加速度分别为0.18g、0.38g,特征周期分别为0.45、0.50 s,工程场地地震基本烈度为Ⅶ度。主桥抗震设防分类为甲类^[4],其抗震设计是本工程的重点和难点。

根据主桥结构特点,主桥可选用的抗震体系主要有减震支座体系、弹性拉索限位体系、黏滞流体阻尼器等。经比选认为,若仅采用减震支座,则索塔根

部纵向弯矩过大;若仅采用黏滞流体阻尼器,则主桥纵向位移过大。最终设计选用了“黏滞流体阻尼器+减震钢盆支座”相结合的方案,通过调整阻尼器参数,使得结构内力和位移均控制在合理范围内,很好地解决了主桥抗震问题。

因此,最终选用的抗震设计方案为主墩布置2个GPZ(2009)12.5JZ减震盆式支座,边墩布置2个GPZ(2009)7JZ减震盆式支座,全桥共10个黏滞流体阻尼器,其规格均为FVD2500/±300-3000-0.35,平面布置如图4所示。

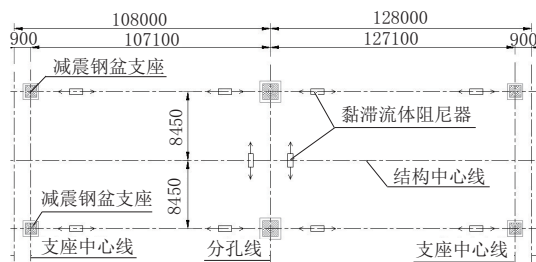


图4 支座及阻尼器平面布置(单位:mm)

4.2.2 计算模型

主梁、索塔、桥墩、承台、相邻跨引桥、桩基均离散为空间梁单元,斜拉索离散为空间桁架单元,主桥基础采用m法计算的土弹簧来考虑桩土相互作用,如图5所示。

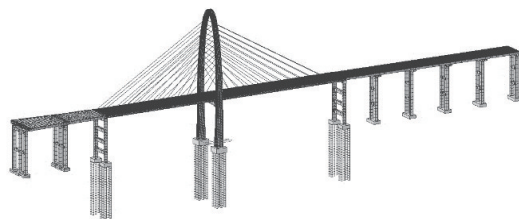


图5 抗震计算模型

根据抗震球钢支座的工作原理以及抗震性能目标,在E1、E2地震作用下固定支座固定销剪断,支座自由滑动,此时黏滞流体阻尼器发挥限位作用。

4.2.3 主要计算结果

(1)E1地震

E1地震作用下,主桥下部结构立柱、系梁等构件的强度均满足设计要求。

(2)E2地震

墩顶位移验算:过渡墩墩顶最大纵向位移为43.5 mm,小于容许位移118.8 mm。最大横向位移为113 mm,小于最大容许位移410 mm。

支座位移量验算:中墩支座横向最大位移为194.9 mm,小于容许位移250 mm;边墩支座横向最大位移295.1 mm,小于容许位移300 mm,均满足要求。

阻尼器性能验算:阻尼器的主要计算结果如表 1 所列。

表 1 E2 作用下最大阻尼力和位移

类别	最大阻尼力/kN	最大位移/mm
过渡墩(纵向)	2 250	137.7
过渡墩(横向)	2 250	194.9
主墩	2 250	216.5

阻尼器设计位移为 300 mm,设计最大阻尼力为 2 500 kN,由表 1 可见,阻尼器性能满足设计要求。

5 施工方案

5.1 索塔竖直提升转体施工

主桥索塔为全钢结构拱形塔,重约 2 100 t,为保证异形塔焊接质量,提出了“卧式拼装,整体竖直提升转体”的施工方案。另外,为保证施工期间桥下横向道路梁山路能正常通行,索塔卧拼时塔脚位置后移,因此索塔竖转就位过程中需边平移边竖转,竖向提升和水平牵引采用同步千斤顶控制,即一边向前平移滑移,一边提升转动,直至索塔竖直就位。

如图 6 所示,为保证塔身稳定,同时避免超红线作业,将提升塔架布置在索塔投影面内,每个塔架的高度为 82 m,前后左右各布置 1 个,共计 4 个。塔架顶布置提升大横梁,采用 560 t 级提升油缸,共布置 6 台。在塔脚设置两道滑轨,分别用 4 台 100 t 级油缸牵引两塔脚。另外还设置了 4 组缆风绳以保证转体过程中索塔的稳定。

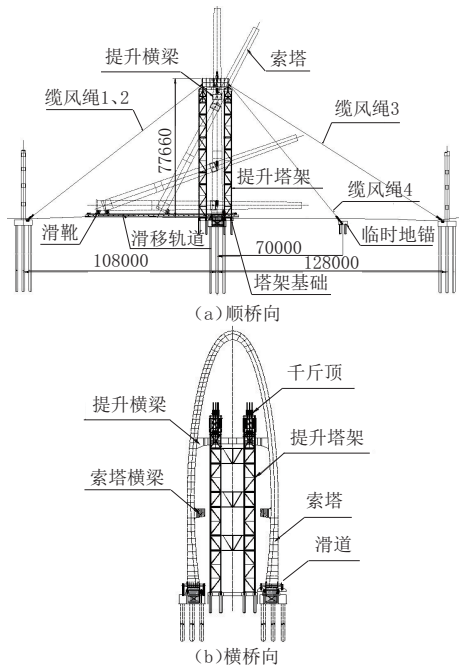


图 6 索塔转体示意图(单位:mm)

钢拱塔提升需设置提升横梁,为节约造价,将原设计的索塔横梁中间段焊接到提升点处作为临时横

梁使用,结束后将横梁的中间部分切割,通过油缸下放到索塔横梁位置焊接,减少了工程废弃,节省工程造价约 140 万元。

施工前对塔架基础、提升过程中主塔总体及局部都进行了详细计算分析^[5],计算模型如图 7 所示,确保了工程顺利安全实施。

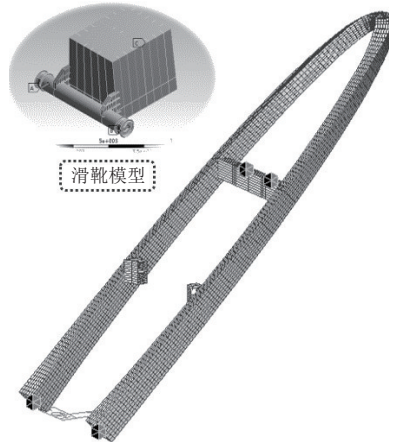


图 7 索塔转体计算模型

5.2 钢主梁平衡悬臂吊装

主桥钢箱梁共 23 个节段,最大节段重量 209.2 t,合计 3 130 t,0 号和 1 号段采用汽车吊原位分块体散装,在主墩两侧搭设临时支架,350 t 汽车吊原位吊装 0#和 1#段。

其余节段采用桥下拼装成整节段后,用 150 t 桥面吊机安装。

经计算,桥面吊机吊装施工时,钢箱梁最大挠度为 10.8 mm,最大局部变形为 1.2 mm。钢箱梁横隔板局部采用加劲板加固,最大应力为 254 MPa,小于 Q355 钢板设计强度 270 MPa。

6 结 语

太史大街西延伸工程主桥采用独塔双索面斜拉桥,跨径布置 108 m+128 m,索塔采用拱形钢塔,主梁采用双边箱钢主梁,桥梁整体造型简洁大气,与周边环境相得益彰。建成后成为当地的地标性建筑,获得群众的一致好评。

索塔施工时首创“现场卧拼,边拖拉边竖转”的施工方案,转体重量达 2 100 t 以上,该施工方案既保证了施工质量,加快了施工进度,同时也满足了施工期间桥下道路不断交的要求。

主梁采用墩顶段支架拼装、标准段架桥机架设方案,对施工全过程进行了详细的检算,为工程的顺利实施提供了有力保障。

(下转第 273 页)