

复杂环境大跨度下承式系杆拱桥设计与施工

龚子松, 邓小伟

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 信义路跨机荷高速大桥建设条件复杂, 控制因素多, 结合桥位特点采用216 m下承式系杆拱桥, 充分利用了桥位地形、地貌, 与周边环境协调, 造型美观, 体现了力与美的完美结合; 采用缆索吊装-斜拉扣挂法, 先拱后梁施工, 减小对机荷高速改扩建工程及既有交通的影响。对该桥的桥位特点、总体布置、主要构造、施工方法、受力特点等进行了详细论述, 可为同类桥设计、施工提供参考。

关键词: 大跨度系杆拱桥; 提篮式钢拱桥; 缆索吊装-斜拉扣挂法; 先拱后梁

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)02-0068-05

Design and Construction of Large-span through Tied Arch Bridges in Complex Environments

GONG Zisong, DENG Xiaowei

[Tongji Architectural Design(Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The construction conditions of Xinyi Road Cross Jihe Expressway Bridge are complex and there are many control factors. Based on the characteristics of the bridge site, a 216 m through type tied arch bridge is adopted, which fully utilizes the terrain and topography of the bridge site, coordinates with the surrounding environment, and has a beautiful appearance, reflecting the perfect combination of strength and beauty; The cable hoisting inclined buckle hanging method is adopted to construct the arch first and then to carry out the beam, which reduces the impact on the renovation and expansion project of Jihe Expressway and the existing traffic. A detailed discussion was conducted on the characteristics of the bridge location, overall layout, main structure, construction methods, and stress characteristics, which can provide reference for the design and construction of similar bridges.

Keywords: large span tied arch bridge; basket style steel arch bridge; cable hoisting-inclined tension buckle hanging method; arch first and then beam

1 工程概况

信义路北延段市政工程位于深圳市龙岗区, 南起现状信义路, 依次穿越现场自然山体、龙岗公众高尔夫球场及机荷高速, 终点与国际大学园路接驳, 是连接深圳国际大学园与大运 AI 小镇的重要通道。本工程道路等级为城市次干路, 设计时速 40 km/h, 双向 4 车道, 跨高速桥下净空不小于 5.5 m, 地震设防烈度为 7 度(0.1g)。

跨机荷高速大桥是本工程的控制性节点, 建设条件复杂, 控制因素多, 主桥采用 216 m 简支系杆拱桥, 桥宽 28.6 m。受机荷高速立体层改扩建工程影响, 主桥下无立临时墩条件, 采用缆索吊装-斜拉扣

挂法, 先拱后梁施工, 减小对机荷高速的影响。

2 桥梁方案

2.1 结构选型

根据总体线位走向, 结合周边地形、地貌, 桥位处主要受以下因素控制。

(1) 上跨高速主桥需 1 跨跨越机荷高速改扩建地面层及地下多条隧道, 中间无立墩条件。桥梁基础与隧道结构边线净距须大于 10 m 以上, 主跨跨径约 216 m。

(2) 结合总体线位及地形、地貌, 桥位南侧为山体, 北侧线位需避开龙口水库保护区, 平面位于直线+缓和曲线+小半径圆曲线($R=90$ m)上, 主桥需采用单跨结构, 尽量减小曲线对主桥的影响。

(3) 桥面标高受跨高速净空及起终点道路衔接影响, 宜尽量减小桥梁结构高度。

收稿日期: 2024-02-22

作者简介: 龚子松(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

跨机荷高速大桥桥位示意图见图 1。

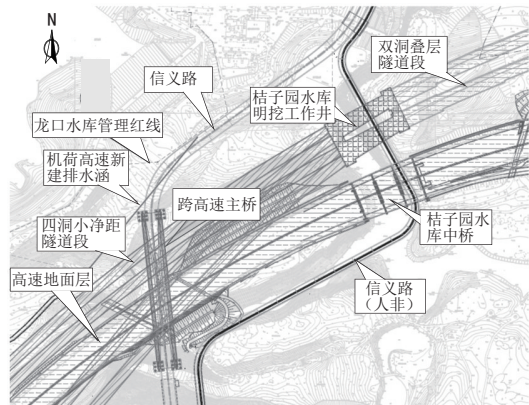


图 1 跨机荷高速大桥桥位示意图

本工程桥位处边界条件复杂,限制条件多,桥型选择拟按以下原则。

- (1)为减少对既有交通和环境的影响,加快施工进度、保证施工质量和外观,优先采用钢结构。
- (2)主桥采用单跨结构,尽量减小桥梁结构高度,桥下净空须满足行车界限要求。
- (3)应选择合适的结构型式和施工方法,尽量减少对机荷高速改扩建及既有交通运行的干扰。

结合本工程特点,上跨高速主桥基础需同时避开机荷高速改扩建地面层及地下多条隧道、现状高尔夫球场的人行通道、过水箱涵等,桥位处边界条件复杂,受机荷高速改扩建及山体地形限制,拟采用单跨结构,跨高速主桥跨径约为 216 m。下承式系杆拱桥是一种较好的选择,其主梁高度较低,有利于路网衔接。

跨机荷高速大桥效果图见图 2。

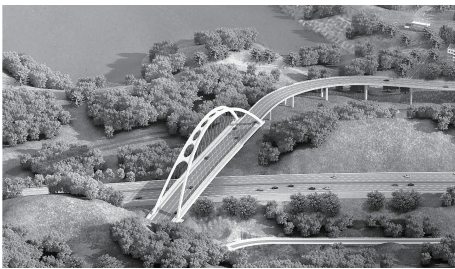


图 2 跨机荷高速大桥效果图

2.2 总体设计

跨高速主桥采用 216 m 下承式简支系杆拱,钢拱钢梁结构。结合总体线位,主桥平面位于直线+缓和曲线上,北面约有 35 m 的超高加宽渐变段;采用弯桥直做,适当加宽桥面以满足行车需求,主桥结构中心线与道路中心线偏置 0.95 m。主桥位于纵坡 4% 的竖曲线上,竖曲线半径为 1 600 m,标准段设置双向 1.5% 的横坡。横断面布置为 0.3 m(栏杆兼防抛

网)+1.0 m(检修道)+3.0~4.268 m(拱肋吊杆区)+0.75 m(防撞护栏)+15.0~16.918 m(车行道)+0.75 m(防撞护栏)+3.30~5.48 m(拱肋吊杆区)+1.0 m(检修道)+0.3 m(栏杆兼防抛网)=28.6 m。

主拱为提篮钢箱拱,内倾 10°,计算跨径为 208 m,拱肋平面内矢高 41.6 m,矢跨比为 1/5,拱轴线采用 2 次抛物线。系梁采用双主梁钢箱梁,全桥纵桥向共设置 21 对吊杆,吊杆纵向间距为 9 m。主桥基础采用 D200 cm 钻孔灌注桩。

跨机荷高速大桥立面布置图见图 3;跨中断面见图 4。

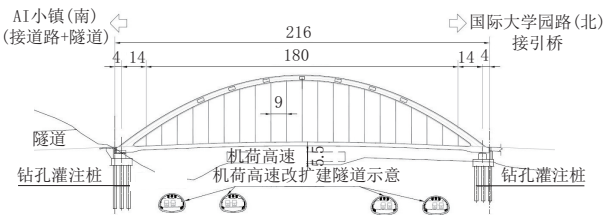


图 3 跨机荷高速大桥立面布置图(单位:m)

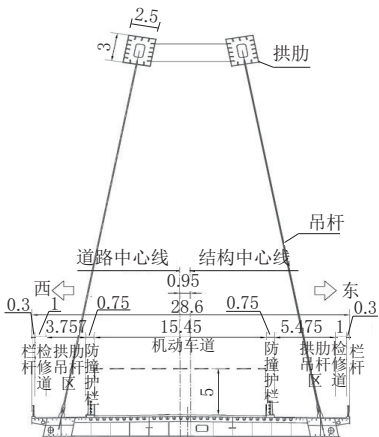


图 4 跨中断面(单位:m)

3 结构设计

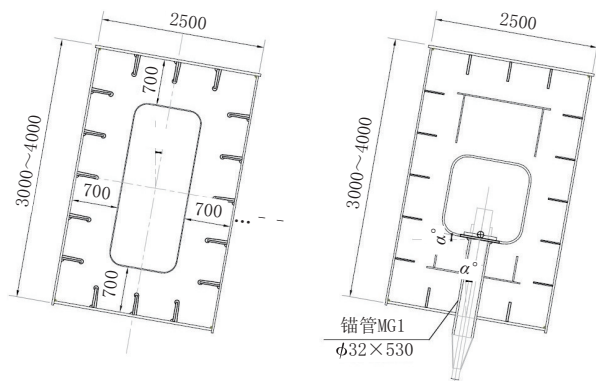
3.1 主拱

主拱肋采用矩形封闭钢箱结构,拱肋高度由拱顶 3 m 渐变至拱脚处的 4 m,拱脚处设置一段 4 m 等高段过渡,拱肋宽度为 2.5 m 不变;拱肋的板厚根据受力情况分段布置,顶底板板厚 40 mm,腹板板厚 30~40 mm,采用厚 25~30 mm 的板肋加劲。拱肋横隔板标准间距为 4.5 m,横肋标准间距为 2 m。除吊杆横隔板铅垂设置外,其他横隔板、横肋均垂直于拱轴线设置。

主拱肋之间设置 7 道钢箱风撑,风撑间距为 18~20.7 m,风撑顶板、底板、腹板均与拱肋横隔板、横肋、纵向加劲肋对齐布置。根据受力情况,风撑顶

板、底板、腹板板厚采用16~25 mm,跨中设置1道横隔板,每隔2 m设置1道横肋。风撑之间设置椭圆形装饰结构,在边风撑外侧呈弧形,与拱肋造型相呼应,装饰结构采用厚度为10 mm的加劲薄钢板。

拱肋标准横肋、吊杆横隔板断面见图5。



(a)标准横肋断面

(b)吊杆横隔板断面

图5 拱肋标准横肋、吊杆横隔板断面(单位:mm)

3.2 系梁

系梁采用双主梁结构,由双主梁、横梁、小纵梁以及桥面板组成。桥宽28.6 m,顶板设置双向1.5%横坡,主梁腹板内倾 10° ,与拱肋保持一致,拱梁结合段腹板采用整体节点板,拱肋顶、底板与主梁相交处设置竖向隔板传力,确保其传力安全可靠。

双主梁布置于桥面两侧,分别与2片拱肋对齐,采用单箱单室钢箱梁,单梁宽2.5 m,标准段梁高2.0 m,拱脚处加大至3.0 m,拱脚处设置4.5 m的梁高渐变段过渡;主梁顶板厚20 mm,设置16 mm×180 mm的板肋加劲,底板板厚25 mm,设置20 mm×240 mm的板肋加劲,拱梁结合段板厚根据受力作相应调整。主梁横隔板间距为4.5 m,横肋间距为2.25 m,与桥面系横梁、横肋保持对应关系。

桥面系由横梁、小纵梁、横肋和桥面板构成,每9 m为1个标准节段,每隔4.5 m设置1道横梁,中间再加道横肋,横肋标准间距为2.25 m。设置2道顺桥向小纵梁,小纵梁间距为7.5 m。桥面板车行道下面采用U型加劲肋,其他区域采用板肋。

主梁横梁断面见图6。

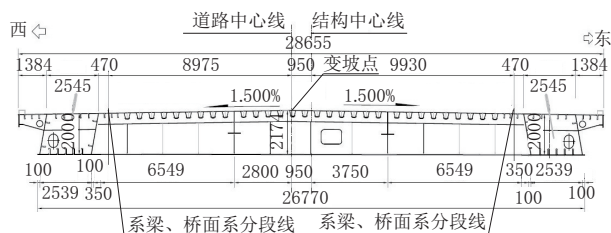


图6 主梁横梁断面(单位:mm)

3.3 吊杆

全桥共设置21对吊杆,顺桥向间距9 m,采用PES7-109型镀锌高强度钢丝成品拉索,锚具为冷铸墩头锚。拱上采用锚管锚固,梁上采用叉耳式锚固,梁上张拉。

3.4 墩台基础

主桥采用双柱式桥墩,埋置式桥台,桥墩立柱尺寸为4.5 m×5.0 m(顺桥向×横桥向),侧面设置检修爬梯;承台尺寸为12 m×34 m×4 m(顺桥向×横桥向×厚度),单个承台下布置14根D200 cm钻孔灌注桩,桩端持力层为第⑪₄层微风化砂岩。

4 施工方案

跨高速主桥采用主跨216 m钢梁-钢拱下承式系杆拱桥,受机荷高速立体层改扩建工程影响,无法设置临时支架,采用缆索吊装-斜拉扣挂法施工^[1],在主桥南北两侧设立缆索吊塔,通过吊索运输拱肋、主梁节段,进行先拱后梁悬臂拼装架设,对机荷高速改扩建工程及既有交通影响小。

跨高速主桥主要施工步骤如下。

(1)场地开挖整平;下部结构基础、承台施工,索塔及锚碇施工,同步工厂加工钢梁、钢拱。

(2)吊装拱梁结合段,利用墩台设置临时支撑,拱脚设置临时限位装置。

(3)分节段吊装拱肋,直至合龙。

(4)拱肋合龙后,施工临时系杆、吊杆,为了不影响主梁节段拼装,临时系杆采用临时外置钢锚箱锚固于拱脚上段。拆除部分扣索,保留南侧部分扣索协助主拱偏载受力。

(5)由南至北逐段拼装主梁,张拉吊杆;分批张拉临时系杆,直至合龙。

(6)拆除临时结构,施工桥面系、竣工通车。

主拱分段吊装示意图见图7;逐段吊装主梁示意图见图8。

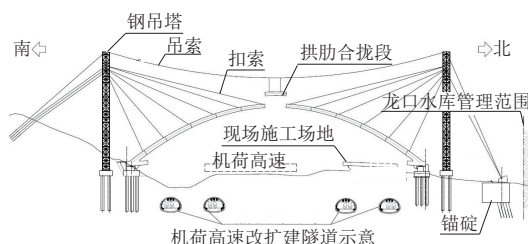


图7 主拱分段吊装示意图

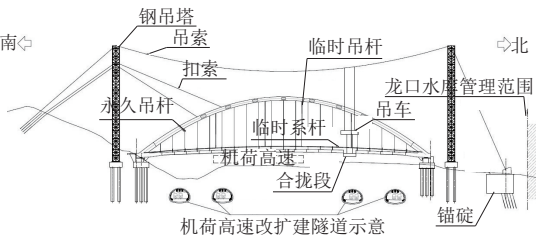


图 8 逐段吊装主梁示意图

5 计算分析

5.1 计算模型

计算采用 MIDAS Civil 2021 (V2.1) 软件模拟 (见图 9), 钢梁、拱采用空间梁单元模拟; 吊杆采用索单元模拟。在实际位置设置支座。主梁采用空间梁格模拟, 梁格模型离散原则为:

- (1) 双主梁与小纵梁模拟为纵向梁单元;
- (2) 横梁、横肋模拟为横向单元。

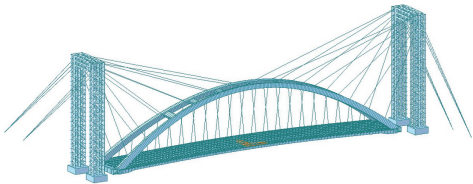


图 9 有限元计算模型

计算荷载包括恒载、汽车荷载、温度荷载、风荷载、地震荷载等, 对结构强度、刚度、稳定性、疲劳、抗震等进行了详细计算, 均满足要求。限于篇幅, 下面仅列出部分主要验算结果。

5.2 静力计算

5.2.1 主拱

基本组合作用下, 拱肋全截面受压 (见图 10)。考虑有效宽度影响, 最大压应力为 186 MPa; 考虑剪扭耦合作用, 拱肋最大剪应力为 28 MPa; 考虑腹板正应力和剪应力共同作用时, 应力组合验算最大系数为 0.69, 小于 1。

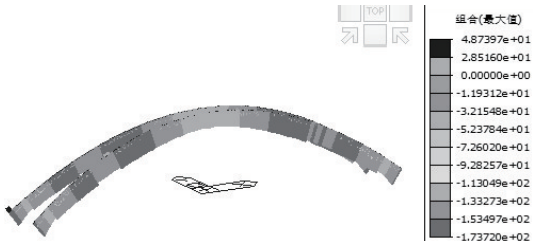


图 10 主拱正应力包络图 (单位: MPa)

按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015) 第 5.4.2 条进行压弯构件整体稳定验算 (见图 11), 拱肋最大压应力为 220 MPa, 小于 270 MPa。

5.2.2 主梁

基本组合作用下, 主梁上缘最大拉应力为 198 MPa,



图 11 主拱整体稳定验算应力包络图 (单位: MPa)

最大压应力为 18 MPa; 下缘最大拉应力为 205 MPa, 最大压应力为 56 MPa, 均小于 270 MPa。考虑剪扭耦合作用, 拱肋最大剪应力为 79 MPa; 考虑腹板正应力和剪应力共同作用时, 应力组合验算最大系数为 0.91, 小于 1。

主梁上翼缘、下翼缘正应力包络图见图 12、图 13。



图 12 主梁上翼缘正应力包络图 (单位: MPa)

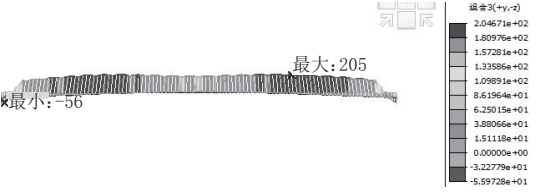


图 13 主梁下翼缘正应力包络图 (单位: MPa)

5.2.3 桥面系

基本组合作用下, 桥面系第一体系应力最大拉应力为 87 MPa, 最大压应力为 8.7 MPa; 第二体系最大拉应力为 129 MPa, 最大压应力为 49 MPa; 考虑 2 个体系叠加后, 最大应力为 216 MPa, 小于 270 MPa。

横梁上缘最大拉应力为 186 MPa, 最大压应力为 235 MPa; 下缘最大拉应力为 232 MPa, 最大压应力为 161 MPa; 均小于 270 MPa。

横肋上缘最大拉应力为 161 MPa, 最大压应力为 185 MPa; 下缘最大拉应力为 113 MPa, 最大压应力为 144 MPa; 均小于 270 MPa。

5.2.4 吊杆

基本组合作用下, PES7-109 型吊杆最大轴力为 2365 kN, 其破断力为 7 005 kN, 安全系数 $K=2.96>2.5$ 。

基本组合吊杆力见图 14。

5.3 稳定分析

考虑结构自重、二期、风荷载为可变荷载, 对成桥整体稳定进行屈曲分析。1 阶为反对称面内失稳,

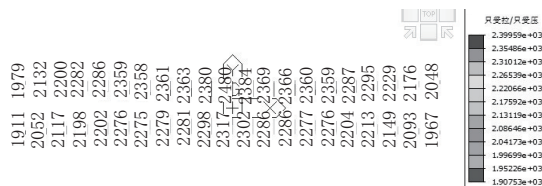
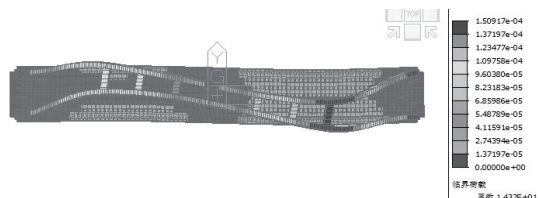


图14 基本组合吊杆力(单位:kN)

最小稳定系数 $K=12.26>4$ 。

1阶模态见图15;2阶模态见图16。

图15 1阶模态,反对称面内失稳($K=12.26$)图16 2阶模态,拱肋反对称面外失稳($K=14.32$)

5.4 抗风性能分析

通过虚拟风洞试验及有限元模拟,对主桥成桥状态的基本风参数、结构动力特性、构件气动参数虚拟风洞试验、风荷载参数、颤振、涡激共振以及风荷载响应进行了研究。桥位地区基本风速37.5 m/s,主桥设计基准风速40 m/s,颤振检验风速66.4 m/s。桥梁1阶竖弯频率为0.426 Hz;主梁体轴阻力系数为1.417;考虑5个风攻角下拱肋不同位置的静气动力系数,上下游拱肋风荷载存在明显的干扰效应,下游拱肋风荷载约为上游拱肋的一半,以指导桥梁结构设计。经分析,主桥各项抗风性能均满足要求。

0°风攻角主拱流场见图17;-3°风攻角主梁流场见图18。



图17 0°风攻角主拱流场

5.5 抗震分析

本工程属于大跨度拱桥,抗震设防分类为甲类,地震基本烈度为7度,地震动基本加速度峰值0.1g,地震作用根据地震安评结果取用。桥梁采用给定剪



图18 -3°风攻角主梁流场

断力(13 500 kN)的拉索减震球钢支座,在静力作用下满足正常使用功能,E2地震作用下固定支座剪断后变成双向活动支座;通过拉索限制结构位移。该体系既可大幅度减小下部结构及基础的地震内力,又能将墩、梁相对位移控制在给定的范围内,通过支座摩擦起到减震耗能作用。经验算,E2地震作用下墩台、桩基承载力满足要求,仍处于弹性状态,震后不需修复或经简单修复即可继续使用。支座的承载力及容许位移满足要求,支座最大顺桥向变形为70 mm,支座最大横桥向变形为69 mm。挡块间隙设置为200 mm,满足减隔震变形需求。

6 结 语

下承式系杆拱桥结构高度小,在满足通行净空的要求下能最大限度减小引桥规模;主桥长度较短,一般为单跨简支结构,能最大限度减小道路线形对主桥的影响;具有受力合理、经济美观、跨越能力和地基适应性强等特点,在中等跨径桥梁中具有较强竞争力^[2]。近些年,钢拱桥建设数量不断增多,跨径不断增大,设计、施工、研究工作取得较大发展,具有较大的应用前景^[3]。本文详细介绍了信义路跨机荷高速大桥的桥位特点、总体布置、主要构造、施工方法,可为同类桥设计、施工提供参考。主要特点如下。

(1)根据高速管理部门要求,主桥需1跨跨越机荷高速改扩建地面层及地下多条隧道。采用216 m下承式简支系杆拱,钢拱钢梁结构,形成自平衡体系,无需另外设置系杆;施工速度快,结构自重轻,可有效减小基础规模,减小对机荷高速改扩建工程隧道的影响。

(2)桥位南侧接隧道,北侧需避开龙口水库保护区,平面位于直线+缓和曲线+小半径圆曲线($R=90$ m)上。结合桥位特点,主桥采用偏置的单跨简支系杆拱,以尽量减小曲线对主桥的影响,结构高度低,便于起终点道路衔接。

(3)主桥下无立临时墩条件,采用缆索吊装-斜拉扣挂法,先拱后梁施工,减小对机荷高速的影响。同时结合场地特点,钢结构组装场地及喂梁区设置

(下转第77页)