

与地铁车站合建的大跨度拱桥设计

王玉国,刘涛,田山坡

(中国铁路设计集团有限公司,天津市 300140)

摘要:深圳市黄木岗交通枢纽立交桥为国内首座站桥合建的下承式大跨度钢拱桥。为了解决枢纽地下车站与拱桥合建问题,对大跨度桥梁与地下结构合建的节点体系构造进行了研究,并采用数值模拟方法分析了站桥合一结构的静力特点和动力特性;同时对桥梁结构的抗风性能、桥梁结构形式及受力特点进行了分析。该桥的设计研究对于站桥合建的桥梁建设提供了新的思路,可供相关人员参考。

关键词:拱桥;站桥合建;交通枢纽;数值模拟

中图分类号:U448.17

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)08-0047-04

1 工程概况

深圳市黄木岗交通枢纽是集轨道交通(7号线、14号线、24号线3线换乘)、市政道路(华富路南北向高架桥、笋岗路东西向地下隧道、地面道路交叉口)、慢行系统、地下空间利用于一体的超大型现代化交通枢纽。华富路跨笋岗路的立交桥跨过枢纽地下车站核心区,采用了站、桥、隧一体共建结构,是国内首座站桥合一的大跨度钢拱桥(见图1)。

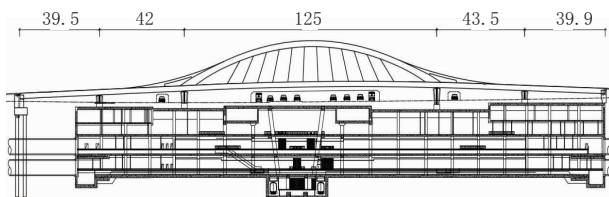


图1 黄木岗立交桥与地铁关系剖面图(单位:m)

枢纽车站为地下4层结构,采用盖挖法施工。市政桥梁为双向6车道,采用主跨125m的曲线变宽下承式双索面单脊拱桥形式。孔跨布置为39.5m+42.0m+125.0m+43.5m+39.9m。主梁和拱肋均为钢结构。最大桥宽34.4m,最小桥宽27.1m。左、右幅桥梁曲线半径分别为 $R=1\ 200\text{ m}$ 和 $R=1\ 800\text{ m}$ 。

2 设计理念

桥梁设计秉承黄木岗交通枢纽引光入城,站城、交通、空间一体化的设计理念。

收稿日期:2023-06-25

基金项目:中国铁路设计集团有限公司科技开发课题(2022A02202001)

作者简介:王玉国(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

2.1 结构体系

为释放用地空间,提升交通功能,节约工程造价,经多方面论证比选,采用大跨度桥梁与枢纽的地下车站同位合建的设计方案。除0#桥台跨越盾构区间位于地下车站范围以外,剩余桥梁1#~5#桥墩通过站桥转换节点与枢纽地下车站合建,形成站、桥、隧一体综合空间结构体系。设计上采用了桥梁以地下车站结构为基础,地下车站结构以上部桥梁结构为抗浮措施的设计思路,增强了桥梁和车站的整体稳定性,提升了结构的受力性能,同时可释放用地空间,大幅节约造价。

2.2 桥梁景观

桥梁设计理念以“木叶”为灵感,采用拱形大跨结构,在保证换乘大厅不受桥梁结构影响其空间品质的同时,桥梁本身结构呈现出的优雅动态造型与城市周边环境融为一体、和谐共生,为城市塑造了新的区域标志形象(见图2)。大曲线拱肋勾勒出树叶轮廓,双索面则呈现出丰富的叶脉纹路;为体现站城一体化理念,采用大开孔鱼腹梁结构打开高架桥引光入城,通过地下结构的采光天窗将自然光引入地下空间,从而使地下空间地表化。采光天窗采用弧形曲面的造型设计,将采光面积最大化的同时,也使天窗本身成为了城市公共景观的组成部分^[1]。

3 桥梁结构形式

为适应站桥合建的要求,采用下承式钢拱桥,使桥拱的水平推力由桥梁本身承担而不传至地铁结构。梁拱均采用钢结构,与混凝土结构相比,钢结构可大



图2 黄木岗立交桥半鸟瞰图

幅减少桥梁传递至地铁结构的荷载。

3.1 主梁

桥梁主跨跨越道路平交口和地铁V柱核心区,跨径125 m。桥平面左、右幅分别位于半径 $R=1\ 000\text{ m}$ 和 $R=1\ 200\text{ m}$ 的圆曲线及直线上。主梁在主跨范围内采用2幅断面,通过横系梁连接;跨中桥宽34.4 m,在拱梁固结段处,分幅断面过渡为整幅断面,最小桥宽27.1 m。主梁设计线处梁高2.3 m,双向1.5%横坡。除拱梁结合段横梁及对应顶底板采用Q420qD钢材外,其余位置均采用Q345qC钢材。

箱梁标准段底板厚度为14 mm,底板加劲肋主要采用扁钢加劲肋形式。箱梁标准段顶板为正交异型钢桥面板,钢桥面板标准段厚度16 mm,桥面板采用U型加劲。全桥共设置4道腹板,标准段腹板厚14 mm,并设置腹板纵向加劲板肋。箱梁横隔采用横隔板和横肋板2种形式。横隔板间距5 m左右,其间设置1道横肋板,横隔板上设置2道水平加劲肋和若干道竖向加劲肋。

主梁横断面图见图3。

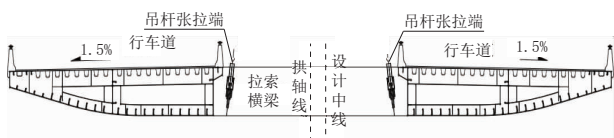


图3 主箱梁横断面图

3.2 拱肋

桥梁拱肋矢高17.5 m,矢跨比1:7.1,拱轴中心线采用2次抛物线。拱肋设置在桥幅中心,拱肋断面由2幅分离的六边形箱室组成,并在拱脚位置过渡为整体箱室拱肋,与箱型系梁固结。2片拱肋净距为80 cm。拱肋断面高度在拱脚位置为变高截面,高度为2.1~3.3 m,其余位置拱肋高度均为2.1 m。拱肋顶底板、加劲肋及横隔板、横梁等钢材材质均采用Q345qC。1/2跨中拱肋典型横断面图见图4。

3.3 吊杆

吊杆采用极限抗拉强度为1 670 MPa的高强钢丝拉索,在主梁横梁内张拉,上部锚固在拱肋横隔板

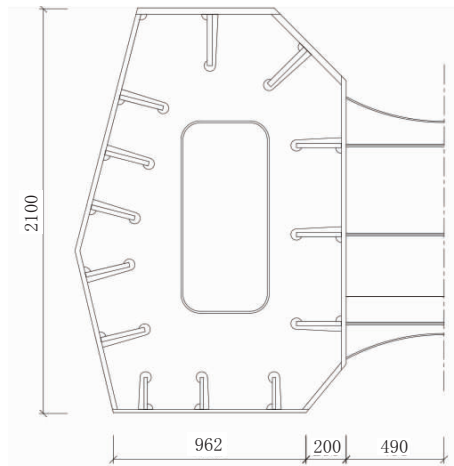


图4 1/2跨中拱肋典型横断面图(单位:mm)

内,吊杆在拱肋上的间距为6.00~6.44 m。吊杆型号有 $\phi 7-91$ 、 $\phi 7-85$ 两种。采用可偏摆的球铰装置的吊杆锚固体体系,单片拱肋共12根吊杆,全桥共24根吊杆。

4 地铁站、高架桥合建方案设计

4.1 合建方案简介

方案一:分离合建式,即桥梁墩台与车站结构脱开设置。此方案的优点是车站主体结构受力简单、传力明确,地震工况下,地震对桥梁产生的作用对车站影响较小;缺点是桥梁的基础形式为浅基础,为满足自身抗震要求,基础所需尺寸较大,对桥梁基础埋深要求也较大,车站顶板为承担桥梁荷载需加厚,进而影响车站埋深,制约车站纵梁的上翻。

方案二:连接合建式,即桥梁墩柱与车站结构浇筑成整体,桥墩尽量与地铁结构柱对位布置。此方案的优点是车站埋深不受影响,桥梁在地震工况下能很好地利用车站结构抵抗地震的不利作用;缺点是车站受力较为复杂,地震工况下会有较大的惯性力传递到车站主体结构上。

方案三:高架桥门式承台方案。地铁车站一般为狭长形结构,高架桥可采用门式桥墩形式横跨车站。此方案的优点是车站与桥梁结构脱开,两者互不影响;缺点是会对地面交通、管线、景观造成影响。

4.2 合建方案确定

黄木岗综合交通枢纽工程所采用的大跨度拱桥方案与一般市政桥梁与地铁车站合建的方案有所不同,其主跨拱桥结构跨度大,地震下水平动力荷载大,同时还需满足车站自然采光的要求。方案一的车站结构无法满足拱桥的抗震要求;方案三则对地面景观影响大,且桥梁墩台会占用辅道车道及综合管线用地。

受道路条件、枢纽布局限制及景观影响,桥梁与车站合建采用方案二。考虑到大跨桥墩布置与地下车站柱网不对位的合建需求,通过设置组合结构转换梁板的形式将上部大跨桥梁荷载转换到地下车站立柱,进而传递到地基。为使地下车站结构承受桥梁大吨位集中荷载,设计中采取以下措施:

(1)调整桥墩在地铁结构转换梁上的位置,使桥墩荷载能均匀传递到地铁结构的6个墩柱上,使各个结构构件发挥出最大的作用。

(2)加大地面以下与地铁结构连接的桥墩底座尺寸,扩散传力节点。

(3)受建筑功能限制,地铁支撑柱截面不能增加(直径1.2 m)。因此地铁立柱采用钢管混凝土结构,水平框架梁和水平转换梁均采用型钢混凝土组合梁,与地铁钢筋混凝土顶板组成箱型框架结构体系。钢管混凝土立柱下设置有柱下钢混桩基。

(4)为避免削弱型钢梁的强度,桥墩主筋与地铁水平转换梁连接采用可焊型钢套筒,而非采用常规的型钢打孔穿入钢筋方式。

合建节点平面、立面结构示意图见图5。

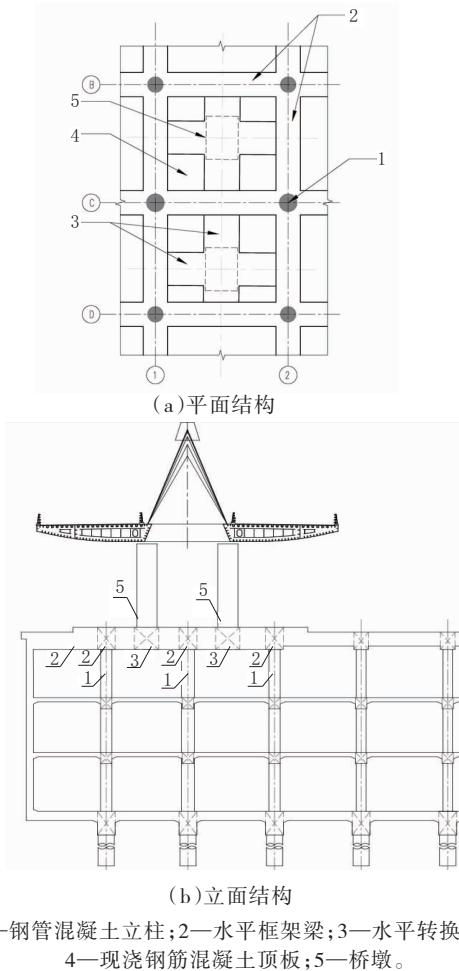


图5 合建节点结构示意图

本项目采用MIDAS Civil有限元数值分析软件对桥梁墩台和地铁车站建立整体结构计算模型。通过计算分析,站桥合建型钢组合梁的裂缝宽度为0.18 mm,地铁车站钢管混凝土柱轴压比不大于0.8,桥墩差异沉降不大于5 mm,满足《城市轨道交通结构抗震设计规范》(GB 50909—2014)要求。

5 结构分析

5.1 桥梁结构静力计算^[2]

考虑到地铁车站刚度较大,可以按照桥墩固结考虑,使用MIDAS Civil有限元软件对桥梁结构建立梁单元梁格模型,对桥梁结构进行整体静力分析;使用MIDAS Fea有限元软件建立板壳单元模型,对拱梁结合段等重点部位进行局部详细有限元分析。

通过整体梁格模型计算分析,在运营阶段叠合第二体系计算结果后得到:钢主梁顶板最大正应力为184 MPa(拉),底板最大正应力为167 MPa(拉);拱肋顶缘最大正应力为218 MPa,下缘最大正应力为173 MPa,小于Q345q钢材设计值270 MPa。通过局部板壳单元分析得到:拱梁结合段最大应力位于主墩处横隔板位置,正应力为247 MPa,Von Mises应力为292 MPa,小于Q420q钢材设计值320 MPa。以上结果均满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D60—2015)要求。

5.2 空间钢拱桥抗风性能研究^[3]

根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)计算得到,桥拱肋结构的设计基准风速为45.2 m/s,结构的驰振检验风速为54.3 m/s。施工状态风速可按10 a重现期换算,取成桥状态的0.84倍。

主梁采用梁格模型,主拱采用空间梁单元模型,对桥梁结构进行结构动力特性分析。成桥状态下桥梁结构的主要动力特性见表1。

表1 成桥状态下的主要动力特性

阶次	频率/Hz	振型特点
1	1.03	拱对称横弯,梁对称扭转
2	3.09	拱反对称竖弯,梁反对称竖弯
3	3.51	拱反对称横弯,梁反对称扭转

通过CFD数值模拟计算,得到了桥梁结构的三分力系数,结构的升力系数斜率为正,说明该结构具备气动力稳定的必要条件。通过拱肋结构涡振性能分析,桥梁在成桥阶段有可能出现竖弯或扭转涡激

共振,但出现涡振的预估风速大于45.2 m/s。由于出现涡振的风速较高,因此不需采取气动控制措施。

5.3 抗震性能研究^[4]

本项目所在场地抗震设防烈度为7度,基本加速度值(地震动峰值加速度)为0.10g。大跨桥梁结构与地铁结构合建,动力特性复杂,因此,需对大跨站桥合一结构体系进行抗震性能计算分析。为减少桥梁对地铁结构的动力响应,桥梁采用降振型分级减震支座。抗震分析采用时程分析法。建立站桥合一结构动力有限元分析模型,桥梁杆件和地铁梁柱采用杆单元,地铁墙体结构采用壳单元,土体与结构之间采用墙弹簧元进行模拟;模型长416.0 m,宽471.5 m,高76.5 m,如图6所示。

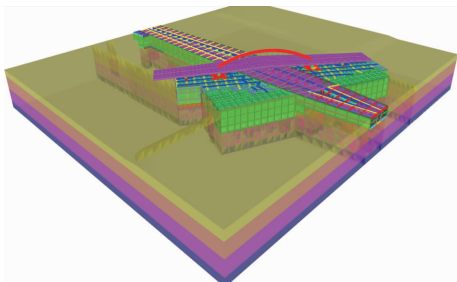


图6 站桥合建抗震计算模型

根据地震组合的内力包络值进行承载力计算,与非地震组合的结构承载能力极限状态和正常使用极限状态结果进行比较,得出桥梁采用降振型分级减震支座后,桥墩、地铁结构各截面尺寸和配筋均不受地震工况控制的结论。

5.4 整体稳定性验算

参考《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020)要求,拱桥成桥阶段弹性屈曲的结构稳定安全系数应不小于4.0。通过MIDAS计算分析,本桥第1阶弹性屈曲稳定特征值为11.9,失稳方向为拱肋横

向失稳,满足上述规范要求。

6 结语

(1)大跨度拱桥与地下枢纽合建,形成站、桥、隧一体综合空间结构体系。设计上采用桥梁以地下车站结构为基础,地下车站结构以上部桥梁结构为抗浮措施的设计思路,可以释放用地空间并大幅节约造价。

(2)桥墩布置在地下结构顶板转换梁上,形成钢管混凝土柱、框架型钢组合梁、型钢转换梁与混凝土顶板组成的箱型框架结构体系,可以解决大吨位墩台竖向集中荷载传递的问题,并可以减少地铁墩柱尺寸。桥梁基础钢筋与型钢转换梁采用可焊接套筒连接,可避免打孔穿筋对型钢梁的削弱。

(3)桥梁采用减隔震支座,并通过箱型框架结构转换体系实现站桥合建,可以提升结构的抗震性能。

(4)桥梁拱肋和拉索设置在桥面中央,机动车道设置在拉索外梁体挑臂上,相比拱肋设置在桥梁两侧可节约用地和保证交通视野。桥梁中央分隔带进行大开孔设计,结合地下结构的采光天窗,实现了引光入城。由于桥梁结构悬挑宽度大,桥梁横向受力及空间扭转效应复杂,值得深入分析。

参考文献:

- [1] 王海涛,周庆,张昊雁.深埋城际铁路沿线地下空间综合规划研究[J].华中建筑,2021,39(6):98-101.
- [2] 李国普,李斐然.大跨度连续下承式钢箱拱桥设计[J].世界桥梁,2016,44(2):12-15.
- [3] 王锋.基于CFD对大跨度连续桥梁抗风性能分析[J].公路工程,2018,43(3):83-86.
- [4] 赵月.与市政桥梁合建的地铁车站结构设计—以厦门地铁吕厝站为例[J].隧道建设,2015,35(5):439-442.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com