

复杂环境下大跨斜交钢箱梁设计分析

曾奔, 饶浩森, 王仕豪

(广州市城市规划勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 为解决复杂环境下大跨径斜交桥梁的设计难题, 针对斜交钢箱梁在复杂条件下的适用性进行了设计分析。借由某具代表性大跨径斜交钢箱梁桥的工程背景, 阐明了在大跨径、大斜交角、软弱地基及复杂空间交通等多重复杂条件下, 桥梁设计中出现的严峻挑战, 基于以上情况, 系统对比了钢箱梁和其他下部结构形式的适用性, 采用有限元数值模拟方法, 对钢箱梁及下部结构进行了静力分析, 获得各构件的内力响应, 最后通过优化钢箱梁的结构布置、支座设计和桥台结构型式, 实现了该斜交桥梁设计方案的全面优化, 大幅提升了此结构在复杂环境下的安全性、经济性和美观性, 为同类复杂工程环境下的大跨径斜交桥梁设计提供了可靠的解决方案。

关键词: 大跨径; 大斜交角; 钢箱梁; 静力分析; 有限元数值模拟

中图分类号: TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)03-0123-05

Design and Analysis of Long-span Skew Steel Box Girder under Complex Conditions

ZENG Ben, RAO Haomiao, WANG Shihao

(Guangzhou Urban Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: To solve the design problems of long-span skew bridges under complex conditions, the applicability of skew steel box girders under complex conditions are designed and analyzed. Taking a representative long-span skew steel box girder bridge as the engineering background, the severe challenges in the bridge design under the complex conditions of large span, high skew angle, weak subgrade and complicated spatial traffic are set forth. Based on the above, the applicability of steel box girders and other substructure forms are systematically compared. The finite element numerical simulation is utilized to conduct the static analysis on the steel box girder and substructures in order to obtain the internal force response of each component. Finally, through the optimization of the structural layout of steel box girder, support design and abutment structural form, the design scheme of the skew bridge is fully optimized to greatly improve the safety, economy and aesthetics of the bridge under complex conditions, which provides a reliable solution for the design of long-span skew bridges under similarly complex engineering environments.

Keywords: long span; large skew angle; steel box girder; static analysis; finite element numerical simulation

1 工程概况

本跨涌桥梁斜交角为 130° , 河涌断面宽约30 m。桥位处钻孔揭露, 此处地质复杂, 土层软弱, 地下溶洞发育, 溶洞规模较大且部分无充填或半充填, 充填物多为软-流塑粉质黏土、松散砂土或粉质黏土夹砂、夹灰岩碎屑等, 较松软。部分溶洞由于顶板厚度小, 溶洞高度大, 且充填物松软或无充填, 在外力作用下, 可能造成顶板塌落, 地面发生塌陷, 影响场地稳定和施工安全。如图1所示, 桥位处地铁线路密

集, 桥位正下方有2条地铁, 共有4条隧洞通过, 导致河涌中间无法立桩, 需一跨过河。两岸桥台位置也受限于地铁隧道本身及安全距离要求的影响, 导致立桩困难。另外水务部门提出河涌南侧需设置防汛通道, 因此桥梁跨径增加至55 m跨。

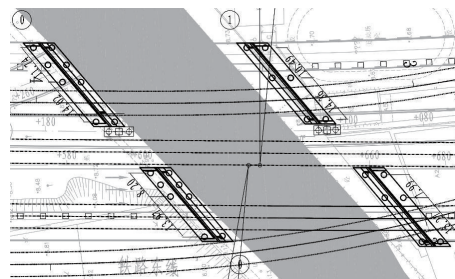


图1 桥位平面图(单位:m)

收稿日期: 2024-03-08

作者简介: 曾奔(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事桥隧设计工作。

综上所述,本工程面临跨径大、斜交角大^[1-4]、地基软弱、地下洞穴多及地铁安全等诸多不利因素,结构设计难度较大,需要综合考虑各方面因素制约、严格结构计算和精细的施工组织设计,以确保桥梁结构安全和可实施性。

2 总体设计

如图2所示,桥梁标准跨径为55 m,简支桥梁,与河涌的斜交角为130°。平面位于直线段、 $L_s=50$ 右偏缓和曲线上,双幅桥布置,单幅桥面总宽19.65 m,中间漏空13.5 m。左幅纵坡为2.47%,右幅纵断面位于 $R=1\ 800$ m的凸曲线上。

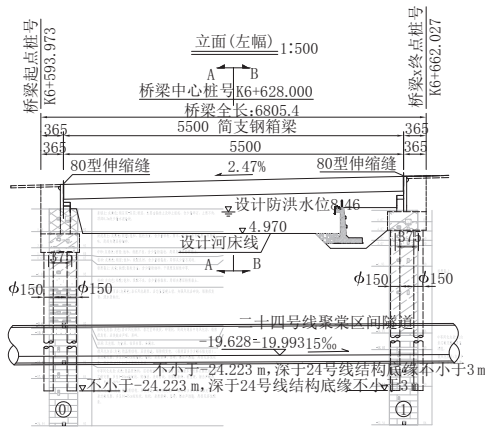


图2 桥型立面图(单位:cm)

上部结构采用钢箱梁,箱梁中心处梁高为2.4 m。下部结构采用薄壁式桥台,钻孔灌注桩基础,桩基直径为1.5 m,按嵌岩桩考虑,要求进入中风化不小于 $3D$,同时根据地铁方面要求,桥梁桩底标高需比地铁隧道底板底深2 m及以上,避免地铁区间盾构时对桥梁桩基有扰动。桥梁横断面布置为:19.65 m=7.65 m(人行道)+11.5 m(车行道)+0.5 m(防撞墙)。

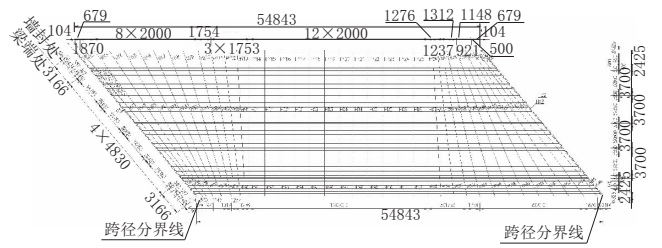
3 结构设计

3.1 上部结构

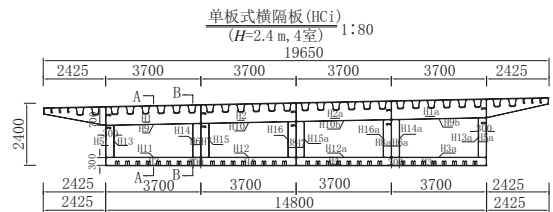
由于桥梁标准跨径为55 m,跨径较大,因此本次上部结构采用简支钢箱梁结构^[5-6]。钢箱梁中心线处梁高2.4 m,箱梁全宽19.65 m。单箱多室结构整体性好,多个室间共用隔板,整体刚度较大,能较好地适应地质条件复杂和不均匀沉降等情况。因此,本次钢箱梁采用单箱四室结构。由于本桥跨度、宽度及斜交角均较大,如果横隔板采用斜交布置,不仅制作困难,对细部结构也较为不利。若采用正交布置,则由于斜交角较大,横隔不能连续,导致斜角范围各纵梁变形差异较大。因此钢箱梁采用扇形布置方

案,即跨中24 m长度范围横隔与纵梁垂直布置,支点横隔板与纵梁斜交,其他横隔板则通过旋转过渡。

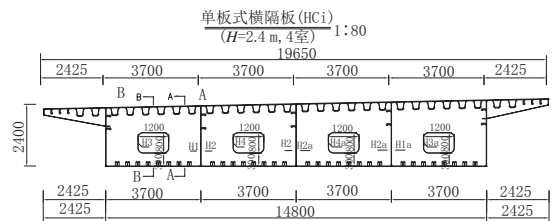
钢箱梁横截面底板保持水平,顶板横坡由腹板高度变化形成,坡度为2%。主梁悬臂2.425 m,悬臂端部高220 mm,根部高420 mm。钢箱梁顶板板厚16 mm,底板板厚14 mm,腹板为14 mm。如图3所示,横隔板分强弱横隔交错布置^[7-9],纵向标准间距均为4 m,支点处横隔板板厚25 mm,其余部位横隔板板厚14 mm。桥面设15 cm厚C50钢纤维混凝土和10 cm沥青面层(车行道)。



(a)顶板平面布置图(单位:cm)



(b)跨中弱横隔(单位:mm)



(c)跨中强横隔(单位:mm)

图3 钢箱梁结构布置图

3.2 下部结构

3.2.1 扩大基础

如图4所示,桥台设计为U形重力式桥台,台帽采用C40钢筋混凝土,厚度为1 m。前墙及侧墙采用C30素混凝土结构(表面加设钢筋网),其中前墙顶宽为1.9 m,侧墙顶宽为0.8 m,背面坡比均为3:1。基础采用C35钢筋混凝土,二阶设计,每阶厚度均为1 m。

由于跨度较大,且斜交角较大,计算桥台基底最大应力约180 kPa,对复合地基承载力要求较高,普通梅花形或方格形间距的单轴搅拌桩地基处理后承载力难以达到。为提高置换比及搅拌桩处理质量,需采用三轴搅拌桩对桥台处基础进行地基处理,布

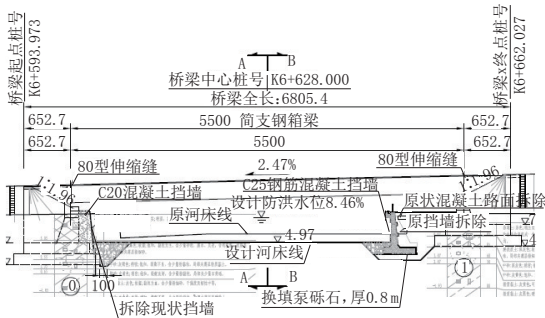


图4 桥型立面图(单位:cm)

置形式为格栅。搅拌桩桩径为800 mm,间距600 mm,双排(单排)咬合,处理范围为桥台基础外0.5 m,处理后地基承载力可达200 kPa以上。格栅式水泥搅拌桩布置图如图5所示。

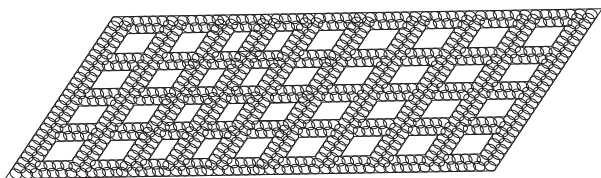


图5 格栅式水泥搅拌桩布置图

3.2.2 桩基础

桥台采用薄壁式桥台,钻孔灌注桩基础,桩基直径为1.5 m。由于需跨越4股地铁隧道,最大桩中距为15.3 m,双排桩布置,承台厚3.5 m。桩基按嵌岩桩考虑,要求进入中风化不小于3D。同时根据地铁方面要求,桥梁桩基与地铁管片外壁需至少有1.5 m净距,同时桥梁桩底标高需比地铁隧道底板底深2 m及以上,为避免地铁区间盾构时对桥梁桩基有扰动。

3.2.3 方案比选

虽然简支梁桥能比较好的适应两边桥台的不均匀沉降,同时不需考虑桥梁桩基与地铁在空间交叉的关系,但是由于桥梁大跨斜交,同时存在软弱土层,因此对地基处理要求较高。另外此处岩溶较发育,且溶洞顶板普遍较薄。桥梁正下方4股地铁隧道,有2股较深在中风化岩层,2股较浅在粉质黏土层。地铁盾构通过时,上面2股较浅地铁线很大可能会对扩大基础桥台有扰动作用。最后,扩大基础则会由于基础较浅,且作为河涌堤岸挡墙,基础底部容易受到水流的冲刷掏空基底,存在一定安全隐患。因此,综合各方面因素考虑,本工程采用桩基础方案。方案对比如表1所列。

4 结构计算

4.1 整体建模

如图6所示,由于桥宽较大且斜角交较大,钢箱

表1 基础方案对比

类别	方案一(扩大基础)	方案二(桩基础)
景观效果	一般	线形简洁、美观
行车舒适性	一般	较好
养护维修	养护维修费较高	养护维修费用少
施工方法、难度	搅拌桩施工质量较难保证	钻孔灌注桩
工期	工期较短	工期较短
优点	无钻孔桩成桩问题	基本解决桩基不均匀沉降问题和地铁盾构施工影响基础及地铁运营期间桥梁稳定问题
缺点	地铁盾构施工及运营期间振动可能导致桥梁振动及沉降	钻孔灌注桩在岩溶区容易出现塌孔,成桩困难问题
方案推荐	比选	推荐

梁均采用板单元进行计算^[10-12],顶板、底板及腹板加劲肋未进行模拟,因此以上计算结果均为第一体系应力。偏安全考虑,计算模型中的自重为图纸中的下料重量,经换算结构自重系数取-1.62。

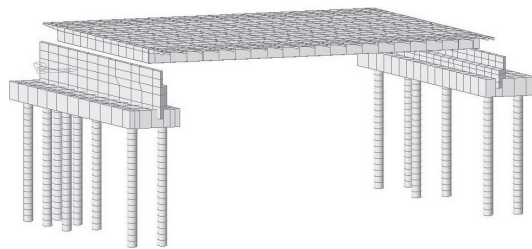


图6 整体桥梁模型

4.2 基本组合主梁第一体系应力

由图7应力云图可知,顶板第一体系下,顶板绝大部分范围应力不超过130 MPa;横隔板在钝角处出现明显的应力集中现象,最大值不超过188 MPa,绝大部分范围应力值不超过110 MPa,富余较大;剪应力值不超过102 MPa,满足受力要求;纵腹板在钝角处出现明显的应力集中现象,最大值不超过221 MPa,绝大部分范围应力值不超过168 MPa,富余较大;剪应力值不超过127 MPa,满足受力要求;底板绝大部分范围应力值不超过129 MPa,富余较大,满足受力要求。

4.3 基本组合主梁第二体系应力

第二体系中,纵肋与桥面板支承于横隔板上,并将自重及外力传递给横隔板,横隔板间距即为纵肋的跨度。本桥采用MIDAS梁单元建模,将U型纵肋如图8(a)所示作为连续梁进行计算^[13],得到第二体系应力的最大值。

由于加劲肋为多跨连续结构,取中跨跨中和支点作为第二体系应力结果。截面应力包络如图8(b)

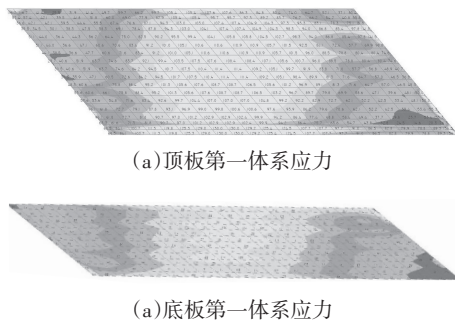


图7 等效应力云图(单位:MPa)

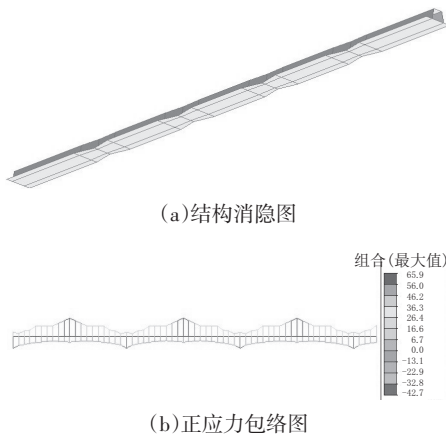


图8 整体桥梁模型(单位:MPa)

所示。由计算结果可知,作为连续梁计算时,U肋正应力 $\sigma_{\max}=65.9\text{ MPa}$, $\sigma_{\min}=-42.7\text{ MPa}$ 。桥面板第一体系与第二体系应力叠加之后^[14-17],为桥面板真实应力。顶板第一体系应力最大值为130 MPa,第二体系应力值66 MPa,顶板在基本组合下最大应力值为196 MPa小于限值,满足受力要求。

4.4 支座反力

基本组合下支座最大支反力如图9所示。

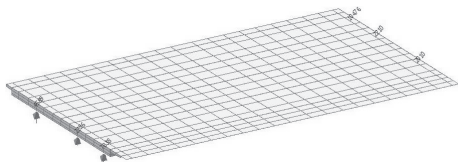


图9 支座反力(单位:kN)

本工程每侧桥台均设置3个盆式支座,是由于斜交角较大,钝角与锐角处反力相差过大,且锐角出现负反力情况,此外受横断面车道及人行道布设位置的影响,两端钝角处支座反力相差较大。当支座在桥台处按均匀布置时,除了两边桥台锐角边支座均出现负反力外,中支座同样出现负反力或者支反力偏小的情况。为此,需通过调整支座位置(往钝角方向偏移,特别是中支座,形成不等距布置)尽量平衡各支座反力。另外,由于桥梁一侧行车,一侧行人,两侧不平衡荷载导致行车一侧锐角负反力偏大。当

不压重时,桥台支座最大反力为12 755 kN,最小反力为-1 031 kN。因此,桥梁在锐角侧需加设铁砂混凝土进行压重处理,调整后桥台支座最大反力为10 476 kN,最小反力为2 010 kN。

4.5 下部结构计算

台身与承台均采用板单元模拟,桩基采用梁单元模拟,桩土之间采用节点弹性支撑模拟土弹簧效应^[18-19]。桥台考虑上部结构荷载之外,还主要受到台后水平向的主动土压力及竖向土压力,台身及承台作为受弯构件计算,桩基作为压弯构件进行计算。台身内力及承载力计算如图10、图11所示。

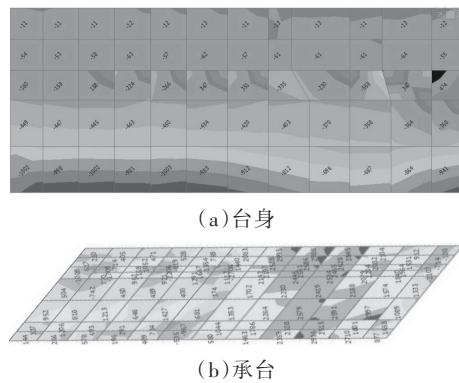


图10 基本组合0号桥台板单元弯矩图(单位:kN·m)

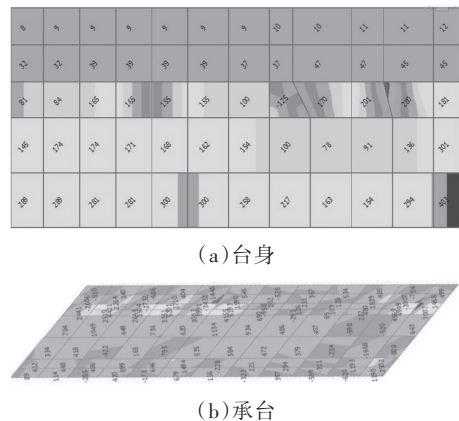


图11 基本组合0号桥台板单元剪力图(单位:kN)

基本组合下,左幅0号台共有8根桩基,桩顶弯矩最大值为1 997 kN·m(x方向)和1 218 kN·m(y方向),轴力最大值为13 261 kN(压),轴力最小值为422 kN(压),可以偏安全地对所有桩基采用以上内力进行包络计算。经验算,加强配筋后采用1.5 m桩基均可满足计算要求。

5 结语

本文对复杂环境下大跨斜交钢箱梁桥结构进行了深入的方案对比与结构分析,得到主要结论如下:

- (1)复杂环境下应尽量采用桩基础,如果采用扩

大基础需详细验算地基承载力,特别是当需要做搅拌桩软弱地基处理时,采用格栅式三轴搅拌桩能达到较大地基承载力和较好的地基处理效果。

(2)大跨斜交简支钢箱梁必须考虑桥面板的第二体系应力,约占桥面板总应力的35%左右。

(3)斜交角较大,锐角处支座极容易脱空,需通过调整支座个数和间距、增加压重等方式以满足支座不出现负反力或者各支座反力相差过大的情况。

(4)桥梁横断面布置对大跨斜交钢箱梁支座反力影响明显,桥梁两端最大支反力差可达30%以上。

(5)大跨斜交钢箱梁由于各支座反力差异较大,桥台桩基验算时必须考虑双向弯矩及轴力的共同作用。

参考文献:

[1] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.11
 [2] 高岛春生.斜梁桥[M].北京:中国建筑工业出版社,1978.
 [3] 小西一郎.钢桥(第六分册)[M].北京:人民交通出版社,1981.
 [4] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.
 [5] Mohseni I, Rashid AK. Transverse Load Distribution of Skew Cast-in-place Concrete Multicell Box-girder Bridges Subjected to Traffic Condition[J]. Latin American journal of Solids and Structures, 2013(2): 247-261.
 [6] 赵秋红,张冀豪,陈宝春.整体式斜交桥抗震性能分析[J].地震工

程与工程振动,2018,38(4):36-42.
 [7] 李海锋,罗永峰.横隔板对薄壁钢箱梁纵向正应力的影响[J].建筑结构学报,2010(增刊1):39-44.
 [8] 张莉.横隔板及几何特征对钢箱梁畸变效应的影响[J].铁道工程学报,2013(8):68-73.
 [9] 黄平明.斜梁桥横向刚度研究[J]中国公路学报,1998(4):58-63.
 [10] 柯赛华,李晓旭,宁建根等.斜交梁桥受力特性及设计研究[J].交通标准化,2012(18):47-52.
 [11] 周冬,于向东.斜交角对斜交梁桥横梁内力的影响分析[J].公路交通科技,2011(4):60-66.
 [12] Chai H Y, Byung H C, Elizabeth M F. Stiffness requirement for longitudinally stiffened box-girder flanges[J]. Journal of Structure Engineering, 2001, 127(6): 705-711.
 [13] 李立峰,邵旭东.扁平钢箱梁闭口U形加劲板屈曲特性理论分析[J].公路交通科技,2008,25(3):88-92.
 [14] 盛兴旺,曾庆元.斜交箱梁的板梁段有限元法[J].中国铁道科学,2004,25(3):55-60.
 [15] 王晖,项贻强.梯形多室箱梁横向内力计算方法研究[J].公路交通科技,2007,24(1):83-86.
 [16] 戴公连,李德建.桥梁结构空间分析设计方法与应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
 [17] 刑志成.弯斜桥计算理论与实用计算[M].北京:人民交通出版社,1994.
 [18] 黄福云,程俊峰,薛俊青,等.带EPS的整体式桥台-桩-土相互作用拟静力试验[J].中国公路学报,2019,32(7):77-89.
 [19] 黄福云,张峰,单玉麟,等.整体式桥台-桩基-土相互作用内内力计算方法研究[J].中国公路学报,2021,34(6):69-79.

《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

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

