

大同市平城街西延双向非对称独塔斜拉桥设计

吴用贤

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:背景工程为山西省大同市平城街西延主线主桥,该桥跨既有铁路编组站及多股重要铁路线。重点介绍主线特大桥梁结构设计与计算,采用双向非对称独塔中央索面斜拉桥,跨径布置为(41+50+163)m,塔柱及主梁均为钢筋混凝土混合结构,为减少对铁路的影响,采用转体施工。经总体静力、局部及动力计算分析,结果表明,该桥结构设计合理,施工安全可靠,可为同类桥梁的设计与施工提供参考和借鉴。

关键词:双向非对称;混合梁斜拉桥;钢塔;转体施工

中图分类号:U442.6

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)02-0059-04

1 设计概要

大同平城街西延跨铁路桥梁位于山西省大同市古城北侧平城街西延线上,线位跨越既有铁路编组站及多股重要铁路线。平城街为城市主干路,道路红线宽50m,呈东西走向,主线高架西起武州西一路,往东依次跨越武州路、规划路、铁路编组站(宽约340m)、西环路、云中路地道,止于魏都大道以西约150m,全长约1716m。根据大同市快速路路网规划,远期西环路为城市快速路,考虑远期与西环快速路连接,在西环路西侧设置两条匝道同平城街主线相联,近期匝道接入现状西环路地面,远期通过局部改造,并入西环高架快速路主线,实现平城街与西环快速路互通互联。跨铁路部分主桥采用主跨163m的特大桥。其效果如图1所示。



图1 大同市平城街西延立交桥效果图

2 结构设计

2.1 总体设计

主线主桥为本项目跨铁路编组站特大桥,为塔墩梁固结体系的混合梁斜拉桥^[1],跨径布置为(41+

50+163)m。为尽量减少对铁路的干扰,主塔基础布置于西侧铁路围墙外,承台与铁轨坡脚垂直距离约8m。采用中央索面布置斜拉索,双索并列,横向间距1.0m,全桥共设24对拉索,边跨混凝土侧间距6m,中跨钢箱梁侧间距为12m,塔上间距为1.5m。主桥总体立面布置如图2所示。

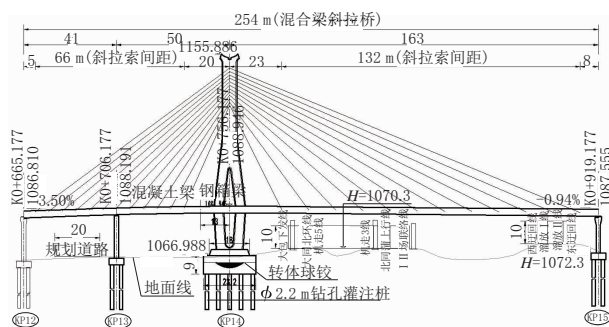


图2 主桥整体布置图(单位:m)

2.2 钢索塔

索塔立面为倒Y形结构,横断面为一字形,塔全高88.9m,总体布置如图3所示。自塔底至塔顶依次为:2.8m嵌入承台塔柱、11.07m钢-混结合段和75.03m钢塔柱。塔柱断面采用箱型,桥面以下部分横桥向宽6.7m,单肢顺桥向宽4.46m,桥面以上部分横桥向宽2.75m。除塔冠外,顺桥向由两根单肢宽4.46m合并为一根,宽6.6m。为节省钢材用量、减少板厚、控制焊接变形,钢索塔采用Q420qE材质,控制板件在50mm以下。钢-混凝土结合位置优选在承台顶面。钢-混凝土结合段(T0段)是钢索塔柱上的结构内力传递到下部结构承台的关键受力构造,设计采用PBL及剪力钉作为传递荷载构件。索塔断面图如图4所示。

主梁与钢索塔采用刚性固结,塔梁结合部位需要

收稿日期:2022-03-18

作者简介:吴用贤(1983—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

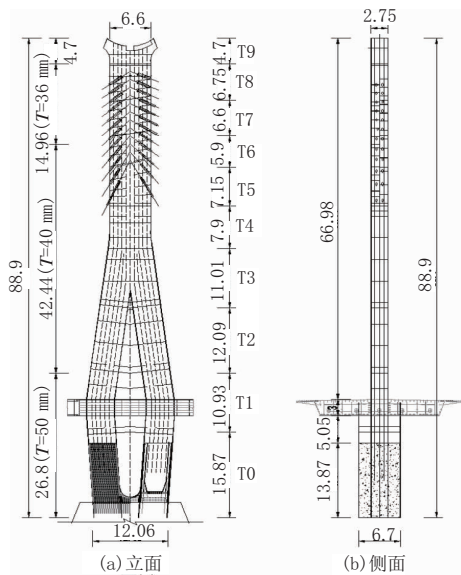


图3 塔柱总体布置图(单位:m)

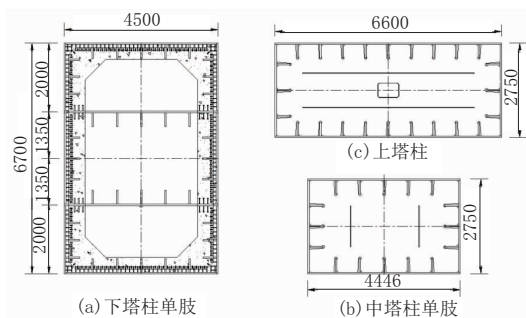


图4 塔柱断面图(单位:m)

传递主梁纵向力、横向力和主塔竖向力。主梁中间两道直腹板和横隔板分别与主塔两个方向壁板对齐。其中,钢索塔顺桥向壁板穿过主梁顶底板,与主梁直腹板形成整板;横桥向壁板分别焊接于顶底板上,主梁内侧设置等厚隔板对齐,并在与主塔内横隔板、横肋对应位置设置横隔板,确保结构传力直接、流畅。

2.3 主梁

受道路线型布置影响,道路中心线在主跨侧近58.4 m长度范围采用圆曲线半径 $R=700$ m的曲线。边跨及部分主跨断面为26.5 m宽的标准横断面。根据立交布置需要,主跨侧过渡墩处钢箱梁宽40.0 m,断面渐变段长度为60 m。其中,道路中心线左右两侧断面为非对称渐变,由13.25 m宽分别渐变为17.25 m、22.75 m。主梁平面布置如图5所示。

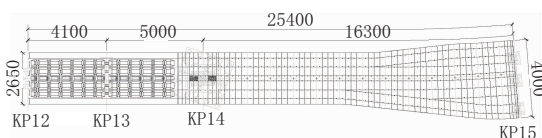


图5 主桥平面布置(单位:cm)

预应力混凝土箱梁采用单箱五室斜腹板截面,混凝土强度等级为C50,道路中心线处梁高3 m。结合边跨侧斜拉索的布置,设置6 m一道横隔板,为提

高混凝土箱梁整体抗裂性能,设计采用了纵横竖三向预应力体系,混凝土箱梁标准横断面如图6所示。考虑到主梁钢混凝土之间内力传递,标准段钢箱梁同样设置五道腹板,并与混凝土箱梁腹板对齐。为适应钢箱梁桥面变宽,保证悬臂长度外观不变及中间拉索锚固区腹板连续性外,箱室腹板在道路中心线左侧由1道过渡为2道,道路中心线右侧由1道逐渐过渡为3道,控制箱室宽度不超过5 m,提高顶底板有效截面面积,减少剪力滞影响。钢箱梁材质为Q345qE,标准钢梁断面如图7所示。

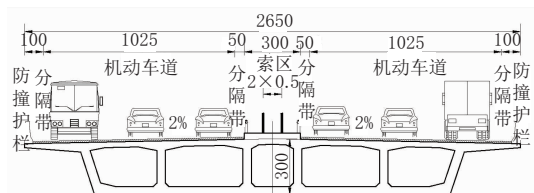


图6 混凝土段横断面布置(单位:cm)

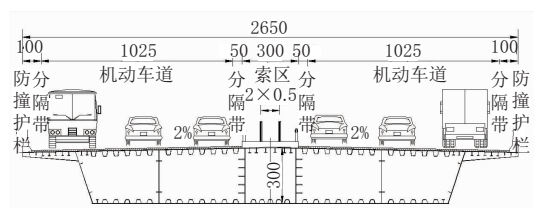


图7 钢梁段横断面布置(单位:cm)

钢-混结合面设置在边跨距塔柱中心线为13 m处,采用承压传力的结构形式,承压隔板厚100 mm,节段长2 m。为使刚度变化较均匀,在钢箱梁U形加劲肋近2.0 m横梁处变为板肋加劲,中间段在U肋上加变高倒T形板肋过渡,板式加肋在结合面处过渡为倒T形。预应力钢束采用单端张拉的形式,固定端位于钢箱梁侧。

本桥钢桥面采用的铺装体系为30 mm浇筑式沥青混凝土(下面层)+40 mm SMA(上面层)。浇筑式沥青混凝土密实性好,在我国北方严寒地区,与钢结构桥面具有很好的适应性[2]。上面层采用SMA主要优点体现在较好的耐磨性及抗滑性、经济性和施工便利性。

3 施工方案

主桥采用转体法施工,下部基础及转动系统施工完成后,搭设塔吊进行塔柱节段吊装施工,同步进行主梁支架塔设。支架沿着既有铁路线搭设,在支架上一次拼装钢箱梁176 m到位及浇筑边跨78 m长。待混凝土箱梁强度达到设计强度的90%,张拉预应力。通过计算进行合理配重,并第一次张拉预应力脱架。拆除塔吊及部分支架,进行称重及配重,试转。试

转成功后,一次转体 72°到位。主梁就位后,进行封铰及支座安装,调整索力,并逐步卸除配重,完成体系转换。施工剩余附属,最后调整索力,主桥完成施工。转体施工关键流程如图 8 所示。

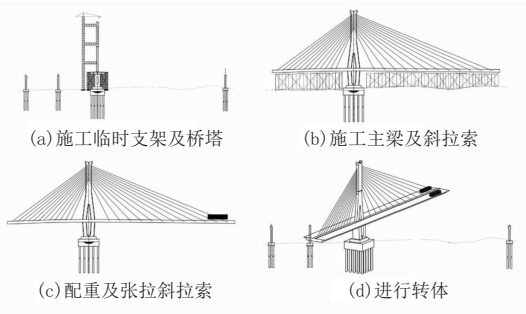


图 8 转体施工关键流程示意图

由于主跨存在横向不对称变宽,施工监控过程中除了要重视纵桥向称重配重外,还应特别对横向配重进行分析^[3]。转体结构的称重试验包括测试不平衡力矩、偏心距、摩阻力和摩阻系数。称重试验结束后,应与理论计算值进行比较,使转体结构纵横向均平衡以确保转体施工的顺利进行。由于该桥没有设置合龙段,为了使两侧主梁同时上墩,施工过程主梁线形控制是关键。施工模拟设计按先张拉斜拉索至第一次设计索力的 50%后再上 100%配重,再调整索力至设计值的 100%。转体就位后,进行第二次索力调整,同时卸除配重,先卸除 50%的配重,再调整 50%的索力,再卸除全部配重,索力调整至第二次设计值。经过模拟计算,施工阶段斜拉索的安全系数最小为 2.2,满足大于 2 的要求。

4 结构计算

4.1 主要技术参数

4.1.1 设计标准

- (1)道路等级:城市主干路。
- (2)设计车速:50 km/h。
- (3)设计荷载:城 -A 级。
- (4)设计基准期:100 a。
- (5)结构安全等级:一级。
- (6)地震基本烈度:8 度。设计基本地震加速度值为 0.2g。根据本桥的工程场地地震安全性评价,场地规范化动力放大系数为 2.5。E1 地震下地表水平峰加速度达到 0.22g,特征周期 0.55 s;E2 地震下地表水平峰加速度达到 0.43g,特征周期 0.80 s。

4.1.2 主要设计荷载

(1)恒载。一期恒载按实际输入的截面面积,其中混凝土容重 26 kN/m³。主梁主塔横隔板、中横梁、

端横梁、锚箱等采用荷载形式计入,二期恒载以荷载形式计入。

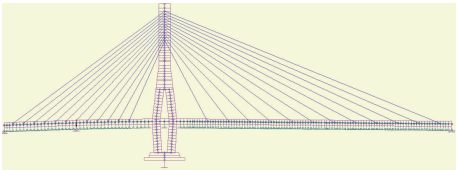
(2)活载。汽车荷载按城 -A 级并提高 30%。

(3)温度荷载。钢结构整体升温 44.6℃,整体降温 -45.1℃。混凝土结构整体升温 35.1℃,整体降温 -31.7℃。梯度温度按规范考虑。

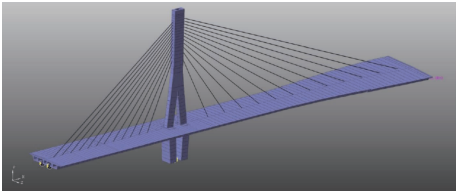
(4)基础沉降。主墩基础按沉降 2.5 cm 考虑,边墩及辅助墩基础按沉降 1.0 cm 考虑。

4.2 总体静力分析

主桥总体静力计算采用 BSAP 程序进行,并运用慧加软件进行了校核,模型采用梁单元与桁架单元混合建模,将全桥离散为有限元模型。对主梁、桥塔采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟。计算模型如图 9 所示。



(a) BSAP 计算模型



(b) 慧加软件计算模型

图 9 计算模型图示

据现行行业规范要求,考虑自重、活载、温度荷载(整体及局部)、风荷载及沉降等作用,对预应力混凝土箱梁、钢箱梁及钢索塔按承载能力极限组合及正常使用极限组合分别验算,主要计算结果见表 1。从中可以看出,两种计算程序基本吻合,且均满足规范要求。

表 1 主要计算结果

项目	BSPA 程序	慧加软件	差值 /%
PC 箱梁(最大应力)/MPa	-15	-16	7
钢箱梁(基本组合)/MPa	-188	-202	7
钢塔(基本组合)/MPa	-230	-236	3

4.3 最宽处横梁有限元分析

针对 KP15 墩区域主梁横向非对称较大的变宽,研究横向受力性能,利用 Midas Civil 建立空间三维局部模型进行有限元分析,模型范围为支点位置起梁长 62.85 m。端部按照实际位置加支座约束,梁中采用固结的方式,拉索处约束竖向位移,将结构体系简化为格子梁体系,纵向腹板及横向隔板分别等效为

纵梁和横梁,上下顶板采用板单元建模。根据圣维南原理,取中间部分(红色区域 21 m)为研究对象,计算模型及车辆布载如图 10 所示。

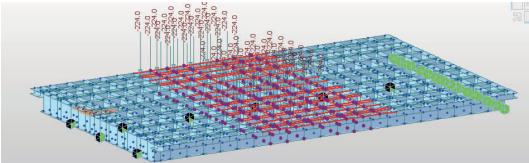


图 10 计算模型及车辆布载

顶底板 Miss 应力如图 11 所示,可以看出顶底板均存在一定的应力分布不均匀现象,且顶板更为严重,但总体应力均小于 120 MPa。各主要构件计算结果见表 2。

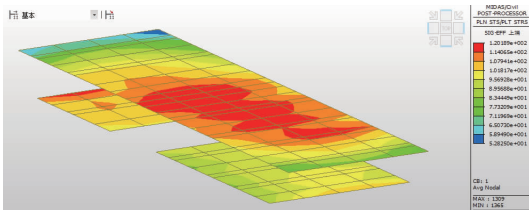


图 11 Miss 应力图(单位:MPa)

表 2 主要计算结果 单位:MPa

项目	计算极值	规范限值
顶底板应力	120	270
纵腹板应力	192	270
隔板应力	70	270

4.4 抗震分析

《城市桥梁抗震设计规范》针对基本烈度 8 度及以上地区修建的斜拉桥优先考虑漂浮体系,综合考虑本桥采用转体施工方案及纵横向双向非对称不平衡,为降低施工对铁路影响的风险,设计选择抗震体系较为不利的塔梁墩固结体系。主桥的抗震计算分析是保证结构安全的重要组成部分,采用 Midas Civil 建立主桥的空间动力分析模型。其中,辅助墩和边墩均采用摩擦摆减隔震支座,各墩处一侧设置双向活动支座,另一侧设置纵向活动支座。西侧边墩采用 JZLYQZ-7 MN,隔震周期 2.8 s;辅助墩采用 JZLYQZ-12.5 MN,隔震周期 2.8 s;东侧边墩采用 JZQZ-5 MN,隔震周期 2.5 s。为了准确分析结构的地震响应及抗震性能,应考虑与之相邻引桥的影响,

建立斜拉桥东西各一联的连续梁桥作为主桥的边界条件。分析模型如图 12 所示。

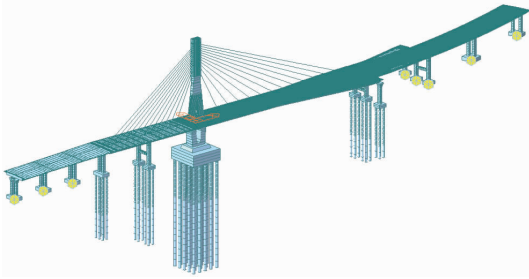


图 12 抗震分析模型

非线性时程分析 E2 地震作用下主要构件响应及其安全系数见表 3。

表 3 E2 地震作用下主要计算结果

构件	(纵向 + 竖向)	(横向 + 竖向)
塔柱应力 /MPa	259/1.62	323/1.3
钢梁应力 /MPa	267/1.29	295/1.17
KP12 墩底弯矩 /(kN·m)	$1.7 \times 10^4/2.25$	$1.4 \times 10^4/2.23$
KP13 墩底弯矩 /(kN·m)	$3.8 \times 10^4/1.08$	$1.1 \times 10^4/2.68$
KP14 塔底弯矩 /(kN·m)	$1.2 \times 10^6/1.02$	$9.8 \times 10^5/1.40$
KP15 墩底弯矩 /(kN·m)	$2.4 \times 10^5/1.33$	$8.8 \times 10^3/3.07$

从表 3 中可以看出,钢梁、钢塔具有一定安全储备。主塔墩底(KP14)在纵向 + 竖向组合下储备较小,但均不小于 1,满足抗震性能要求。

5 结 语

本文介绍了一座主跨 163 m 跨铁路双向非对称独塔斜拉桥的设计与施工。针对桥址处地震烈度高、主梁双向不对称大幅变宽等特点,详细介绍了主桥总体设计、主塔及主梁的结构构造及转体施工方案,并对主桥总体静力计算、变宽处局部三维分析及抗震分析。经计算表明,该桥结构设计合理,施工方案安全可靠,可为同类桥梁的设计与施工提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 吴冲. 现代钢桥(上)[M].北京:人民交通出版社,2006.
[2] 侯贵,王选仓,孙耀宁,等. 严寒地区钢桥面浇筑式沥青混凝土低温性能试验研究[J]. 公路交通科技,2018,35(3):58-63.
[3] 余天亮,方永伟,吴用贤. 某独塔混合梁斜拉桥施工分析[J]. 土木工程,2020,9(5):521-531.