

小半径曲线双索面部分斜拉桥结构设计

黄 华

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要:在城市与公路桥梁建设中,大跨径小半径曲线桥梁目前多采用连续刚构或连续梁,在后期运营中都存在腹板开裂和跨中挠度大等问题。曲线部分斜拉桥是一种经济合理兼具良好景观效果的结构形式,然而国内外设计、修建的曲线部分斜拉桥数量很少,相关研究也局限于直线部分斜拉桥范围,故曲线部分斜拉桥的实践和研究意义重大。九江市新建快速路跨昌九快速路节点桥是目前国内平曲线半径最小的空间双索面部分斜拉桥,通过对该桥的设计及分析研究,总结出该种桥型结构设计的一些实用经验,可为类似桥梁设计提供有益的参考。

关键词:曲线部分斜拉桥;空间双索面;结构设计;弯扭耦合

中图分类号: U448.27

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)05-0074-04

0 引言

部分斜拉桥是结构特性介于大跨梁式桥和斜拉桥之间的一种组合结构形式。现今普遍认为在跨径100~300 m之间,部分斜拉桥与相同跨径的其他桥型相比,具有出色的结构性能、良好的经济指标及优美的桥梁造型等优势,在公路、铁路及市政桥梁的选型中有着极强的竞争力。

近年来,部分斜拉桥发展迅速,在国内外实际工程中得到了广泛的应用,但统计表明修建的大多为直线桥,曲线尤其是小半径曲线部分斜拉桥则相当少见。国内比较有代表性的曲线部分斜拉桥如贵州龙井河大桥,该桥为我国第一座曲线部分斜拉桥,主桥桥跨布置为86 m+160 m+86 m,双排单索面形式,主桥平面位于半径852.75 m的圆曲线上^[1]。

曲线部分斜拉桥是在传统曲线连续刚构结构的基础上,增加较低的桥塔和体外斜拉索的一种结构形式。目前国内修建大跨径曲线桥多常采用连续刚构或连续梁结构,而避免直接将斜拉桥、拱桥和悬索桥设计在曲线上。但大跨径曲线连续刚构桥弯扭耦合效应突出,曲线体内预应力束损失大,而且若预应力束布置不当还易加剧扭转效应,进一步对结构抗扭造成不利。另外大跨刚构桥在后期运营中普遍还存在腹板开裂、挠度大等问题^[2]。而采用的刚构体系部分斜拉桥结构方案不仅整体造型优美,还可以很

好的解决曲线连续刚构的种种问题,其斜拉索相当于体外束,在降低结构高度的同时,部分斜拉桥可以利用斜拉索来提高结构整体抗扭性能,斜拉索还可以作为防范桥梁运营期跨中下挠过大的措施,并且能解决合龙钢束配束量大的问题,可以大大降低张拉合龙钢束时跨中底板受压崩坏的风险。

因此,在修建大跨径曲线桥梁时,采用曲线部分斜拉桥这种桥型是一种较好选择,而目前国内外针对曲线部分斜拉桥的研究较少,故开展曲线部分斜拉桥的实践和研究具有一定的创新性,不仅能拓展部分斜拉桥的适用范围,而且具有很高的工程应用价值。

1 工程概况

九江市新建快速路系统(一期)工程跨昌九快速路节点桥位于项目起点段,顺接昌九高改快工程新建收费站,并上跨昌九快速路。桥梁平面位于 $R=350$ m的圆曲线上,桥梁与现状昌九快速路交角为 58.4° 。

主桥采用65+120+65 m空间双索面部分斜拉桥结构,墩、塔、梁固结刚构体系,引桥采用30 m跨径先简支后桥面连续预应力混凝土小箱梁。

桥梁设计荷载等级为城-A级,主桥桥面全宽16 m,具体布置为1.625 m(索区)+0.5 m(防撞护栏)+11.75 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+1.625 m(索区)=16 m。

主桥整体造型轻盈优美,索塔呈大“V”字造型,有胜利圆满之美好寓意。本桥的建设可为城市增添一道亮丽的人文景观,成为当地的一标志性建筑,图1为跨昌九快速路节点桥效果图。

收稿日期: 2021-08-31

作者简介: 黄华(1979—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁结构设计工作。



图 1 跨昌九快速路节点桥效果图

2 主桥结构设计

2.1 主梁

主梁采用变高度预应力混凝土连续箱梁,采用 C55 混凝土,斜腹板单箱双室截面,腹板斜率为 1 : 1.846,竖直倾角为 28°。考虑曲线平面影响,为保证拉索锚固区布置空间,箱梁两侧悬臂长设为 1.7m,箱梁顶结构宽 16.0 m,底宽 10~8.375 m。箱梁顶底面保持平行,桥面设单向 3%超高横坡,通过结构整体刚性旋转形成。

主梁跨中梁高 3.0 m,支点处梁高 4.5 m,变高段梁底按 1.6 次抛物线变化。中跨合龙段长 3.0 m,边跨合龙段长 2.0 m,边跨现浇段长 4.5 m。箱梁顶板厚 25 cm;底板厚 22~70 cm;中跨跨中及边跨腹板厚 45 cm,靠近主墩处腹板厚 65 cm。

桥梁 0 号块长 12 m,单侧有 11 个悬臂浇筑节段,节段长度分为 4.0 m、5.0 m 两种,最重的悬臂浇注节段为 1 号节段,其重量为 2 574 kN,挂篮控制重量 1 150 kN。在箱梁中支点、边支点处均设置了横隔梁,厚度分别为 3.5 m 和 1.5 m;斜拉索锚固区处均设有横隔板,厚度为 40 cm,实腹式布置。

2.2 主塔

主塔在横断面上采用 V 字造型,与主梁固接,采用 C55 混凝土。桥塔总高 40.5 m,其中桥面以上塔柱高 16.5 m,桥面以下塔柱高 24 m,单侧塔柱竖直面处在半径 186.946 m 的圆曲线上,塔柱采用矩形实体截面,上塔柱截面尺寸为 3.5 m(纵桥向)×1.8 m(横桥向),下塔柱截面尺寸为 3.5 m(纵桥向)×2.5 m(横桥向)。主塔与主梁固结处设实心横梁,横梁高与主梁一致为 4.5 m,宽 3.5 m。塔柱在塔底通过高 2 m 的塔座连接为整体,塔座底宽 6.489 m。

主塔基础采用桩接承台的基础形式。承台平面尺寸为 11.0 m(横)×11.0 m(纵),承台厚 4.0 m。承台下布置 9 根直径 1.8 m 桩基,横桥与顺桥向均设置 3 排,桩间距均为 4 m。承台采用 C30 混凝土,桩基为

水下 C30 混凝土,桩基础采用嵌岩桩设计,索塔结构见图 2。

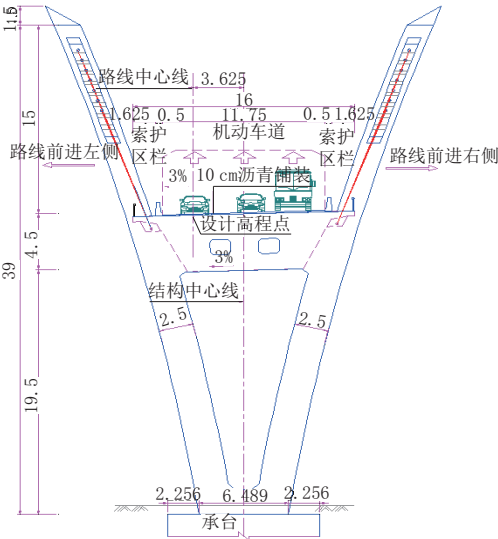


图 2 索塔结构图(单位:m)

2.3 斜拉索及锚固系统

(1)总体布置

斜拉索为外倾式扇形双索面,每侧主塔锚固 7 对斜拉索,全桥共计 56 根拉索,拉索与水平面夹角为 15.8°~25.9°,塔上索间距 0.8 m,梁上索间距为 5.0 m。斜拉索在主塔塔顶通过分丝管式转向鞍座连续通过,两侧锚固于箱梁悬臂处锚块上。

(2)斜拉索规格

斜拉索采用单层 PE 防护单丝涂覆环氧涂层钢绞线,规格为 27-Φs15.2 m,抗拉强度设计值 $f_{pk} = 1\ 860\text{ MPa}$,斜拉索张力为 3 100~3 300 kN。钢绞线设置三层防护,内层为环氧涂层防护层,中间设油脂或石蜡防护层,外层设 HDPE 外套管采用抗风雨激振型双螺旋线圆管护套,护套规格为 Φ180×6.6,外观采用白色。

斜拉索锚具采用 250 型拉索夹片群锚,在两侧梁端张拉,锚具内安装 CCT20B 磁通量传感器,使拉索成为智能化拉索,实现拉索索力实时监测(每根拉索一端拉索锚具内安装 3 台 CCT20B 磁通量传感器)。索道管口钢管与斜拉索之间设减振器,减振器对索体的横向振动起减振作用,从而提高索的整体寿命。斜拉索锚固断面见图 3。

(3)索鞍设计

塔柱内索鞍结构采用分丝技术,分丝管由 27 根钢管组焊接成整体,埋设于混凝土塔内,斜拉索钢绞线通过分丝管穿过塔身,索鞍中的导向钢管承受钢绞线由于单根张拉后造成的相互挤压,钢绞线受力均匀,索鞍很好地起到分散、均匀传递载荷作用。

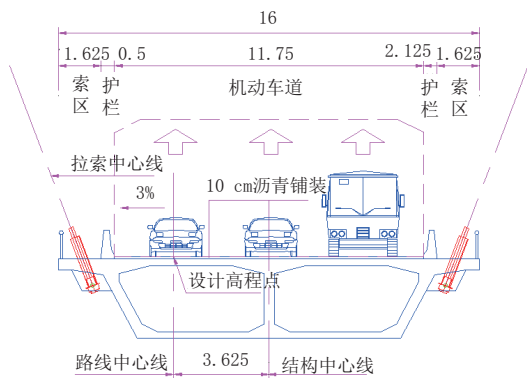


图3 斜拉索锚固断面图(单位:m)

为实现线钢绞线单根换索,索鞍抗滑锚固装置采用单侧双向抗滑锚固装置,抗滑键全部布置在转向鞍的一侧,依靠锁紧装置将其固定在转向鞍的端面。

2.4 结构约束体系

主塔处采用塔梁固结体系,过渡墩上设置仅可沿顺桥向活动的竖向支座。

2.5 施工工艺

主桥逐节段采用挂篮悬臂施工工艺,斜拉索索力随节段施工一次张拉到位,合龙顺序为先边跨后中跨,边跨现浇段采用墩旁支架现浇。

3 主桥结构计算

3.1 模型建立

采用 Midas Civil 2019 进行结构分析,全桥三维有限元模型如图4所示。全桥共划分为668个节点,627个单元。斜拉索采用桁架单元模拟,并按照恩斯特公式对拉索弹性模量进行修正^[3]。桥塔、主梁采用7自由度空间梁单元模拟^[4],桩基承台采用6自由度空间梁单元模拟。

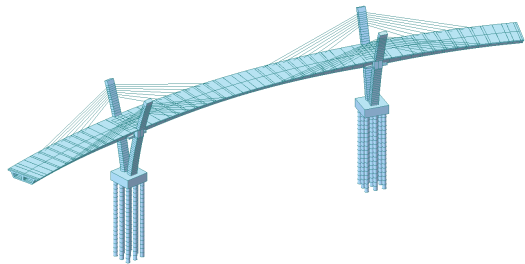


图4 主桥三维有限元模型

结构的约束条件:桥塔与主梁之间采用固结体系;过渡墩上设置仅可沿顺桥向滑动的竖向支座;桩土作用采用土弹簧模拟,按m法计算土弹簧刚度。

根据设计施工顺序模拟混凝土墩、塔、梁浇筑。主体结构施工顺序:先施工主塔下塔柱及中横梁,然后搭设支架浇筑0号块。接着用挂篮依次浇筑1#~

11#梁段,并张拉各节段纵、竖向预应力束;自3#节段预应力张拉完毕起,每施工一个节段,应对称依次张拉一对斜拉索。11#梁段浇筑的同时,在过渡墩旁搭设支架浇筑边跨现浇段,待11#梁段完成后,拆除挂篮,进行边跨合龙,然后进行中跨合龙,完成主体结构施工。

3.2 成桥索力

为了使成桥时结构受力、成桥线形等在结构自重作用下达合理的范围,通过影响矩阵法进行调索确定全桥合理的成桥索力如图5所示。

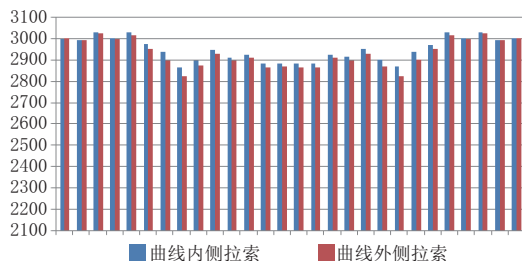


图5 成桥索力汇总表(单位:kN)

由图4可知,成桥阶段全桥索力比较均匀,与直线桥不同的是,小半径曲线部分斜拉桥由于弯扭耦合作用,同一位置处每对斜拉索曲线内外侧索力并不完全对称,内侧索力要略大于外侧索力,最大差异接近1%;对称于主塔两侧的斜拉索的索力也不对称,边跨侧索力要略大于中跨侧索力,约大2.5%~4.5%。

常规直线部分斜拉桥斜拉索承担的竖向荷载比一般为0.3~0.4^[5],对于小半径曲线部分斜拉桥,由于过多的体内预应力束的配置会对主梁产生较大附加扭矩,因此适当的提高索梁荷载比有利于改善结构受力,本桥斜拉索承担的竖向荷载比为0.46。

3.3 主要计算结论

(1)主梁计算

主梁纵向按全预应力构件设计。

持久状态频遇组合下,主梁正截面全截面受压;斜截面混凝土最大主拉应力 $0.73 \text{ MPa} \leq 0.49 f_{tk} = 1.096 \text{ MPa}$,抗裂验算满足规范要求。

持久状态标准组合下,主梁正截面最大压应力 $16.95 \text{ MPa} \leq 0.5 f_{ck} = 17.75 \text{ MPa}$;主梁斜截面最大主压应力 $16.95 \text{ MPa} \leq 0.5 f_{ck} = 17.75 \text{ MPa}$,满足规范要求。

(2)主塔计算

主塔上塔柱按照A类预应力混凝土构件计算,下塔柱按照钢筋混凝土偏压构件计算。经验算均能满足规范要求,此处不再赘述。

(3)结构刚度计算

根据结构静力分析,成桥状态下主梁跨中计算竖向位移 13 mm(向下),塔顶计算纵向水平位移 32 mm,计算横向水平位移 82 mm,成桥状态桥塔横向位移较大,这是因为桥塔横向位移对平曲线半径较为敏感,塔顶横向位移随着平曲线半径的减小而增大^[6]。

活载作用下主梁最大竖向位移 32 mm(向下),塔顶最大纵向水平位移 6 mm,最大横向水平位移 4 mm,可见结构有良好的刚度,满足规范要求。

(4)斜拉索计算

本桥斜拉索规格均为 27- Φ s15.2 m,根据《公路斜拉桥设计规范》(JTG/T 3365-01—2020)7.2.4 条,斜拉索承载力验算:

$$\frac{\gamma_0 N_d}{A} = 1\,124.2 \text{ MPa} < \phi_d f_d = 1\,507.5 \text{ MPa}$$

式中: γ_0 为斜拉索的轴向拉力设计值(N); A 为斜拉索的截面面积(mm²); ϕ_d 为斜拉桥的结构体系修正系数,对于部分斜拉桥, $\phi_d=1.5$;其余结构体系, $\phi=1.0$; f_d 为斜拉索的抗拉强度设计值(MPa),在持久状况,按 3.3.1 或 3.3.2 的规定取值;在短暂状况,斜拉索的抗拉强度设计值宜提高 25%。

依据计算结果可知,斜拉索承载力满足规范要求。

疲劳荷载作用下斜拉索最大应力幅为 9 MPa,满足规范要求。

(5)稳定计算

成桥状态屈曲稳定分析得到结构弹性屈曲安全系数为 46.3,满足规范要求,失稳模态为桥塔横弯失稳。

4 结 语

在城市与公路桥梁建设中,为适应路线线形设计的要求,不可避免地要修建大量曲线桥。在修建大跨径曲线桥梁时,曲线部分斜拉桥是一种经济合理并兼具良好景观效果的结构形式,九江市新建快速路跨昌九快速路节点桥是目前国内平曲线半径最小的空间双索面部分斜拉桥,通过对该桥的设计及计算分析,总结出该种桥型结构设计的一些有用的经

验,可为类似桥梁设计提供有益的参考。

(1)曲线部分斜拉桥的扭转效应较直线桥大,设计中要对结构的抗扭引起足够重视,建议选用刚构体系,同时对结构横梁应适当加强并配置足够的抗扭钢筋以抵抗主梁根部的强大扭矩。

(2)由于桥梁平曲线的存在,空间索面的曲线部分斜拉桥的斜拉索不仅在主梁上张拉、锚固设计更加复杂,在保证拉索锚固区布置空间的同时还要谨防斜拉索侵入净空限界,可以适当加大拉索锚固区的宽度。

(3)曲线部分斜拉桥,过多的体内预应力束的配置会对主梁产生较大附加扭矩,宜适当提高斜拉索承担的竖向荷载比,以减少体内束的配置,改善结构受力,本桥斜拉索承担的竖向荷载比 0.46。

(4)成桥阶段,曲线部分斜拉桥中同一位置处每对斜拉索曲线内外侧索力并不完全对称,曲线内侧索力要略大于曲线外侧索力;对称于主塔两侧的斜拉索索力也不对称,边跨侧索力要略大于中跨侧索力。

(5)曲线半径对主梁根部的扭矩及塔顶横向位移的影响较大,结构设计中对小半径曲线部分斜拉桥主塔的横向刚度要有足够重视。相比于直线桥,宜适当增加桥塔横向尺寸以提高其横向刚度,同时宜在主塔中设置预应力钢束平衡主塔截面的不平衡内力。

参考文献:

- [1] 易金刚.曲线刚构体系矮塔斜拉桥关键技术研究[D].贵州:贵州大学,2017
- [2] 中交公路规划设计院有限公司.《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》应用指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [3] JTG/T 3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].
- [4] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [5] 刘世明,李晓克.独塔部分斜拉桥设计实例分析[M].北京:中国电力出版社,2016
- [6] 杨健.曲线矮塔斜拉桥空间效应及施工监控方法研究[D].西安:长安大学,2017.