

佛山市南庄大桥结构与静力分析

郭 济

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 基于主跨 268 m 的佛山市南庄大桥, 介绍独塔双索面混合梁斜拉桥的结构体系和施工方案, 研究得到该桥合理的成桥状态。在此基础上, 分别给出施工状态和成桥状态下的静力分析结果, 并对结构的整体稳定安全性进行评估。

关键词: 独塔斜拉桥; 混合梁; 结构设计; 静力分析

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)05-0072-04

1 概 况

近 30 年来, 随着我国交通基础设施建设投资力度不断加大, 我国大型桥梁的修建规模呈快速增长的趋势。斜拉桥以其跨越能力强、造型优美而备受人们的青睐, 其中独塔斜拉桥在 100~300 m 跨径范围内具备竞争力^[1-2]。

本文介绍的佛山市南庄大桥为主跨 268 m 的独塔双索面斜拉桥(见图 1)。设计中, 为满足水利部门对大堤保护的要求, 斜拉桥主塔设置于佛山市东平水道西侧, 主跨 1 跨跨越大堤, 边墩设置于水道东侧大堤外。斜拉桥跨径布置为 65 m+75 m+268 m, 主梁为混合式箱形梁, 其中主跨采用全钢梁, 边跨采用预应力混凝土箱梁, 主塔造型为宝瓶形, 下部采用大直径钻孔灌注桩基础。

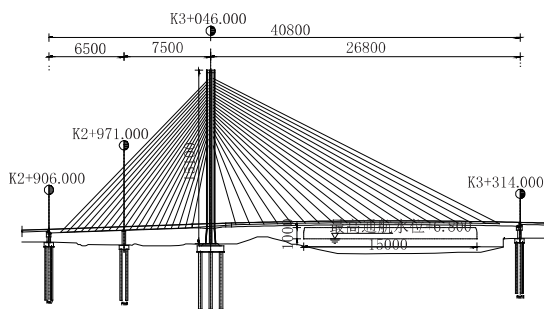


图 1 南庄大桥总体布置(单位:m)

2 结构设计

2.1 技术标准

- (1)道路等级: I 级公路, 兼顾城市道路功能。
- (2)主线设计速度: 60 km/h。
- (3)桥梁设计荷载: 汽车荷载为公路 -I 级并按

城 -A 级验算, 人群荷载 3.5 kN/m²。

(4) 抗震设防类别为 A 类, 抗震设防烈度为 7 度, 抗震设防措施等级为 8 度, 抗震重要性系数 E1 地震作用下为 1.0、E2 地震作用下为 1.7。

(5) 设计风速: 设计基本风速 $V_{10}=31.3$ m/s(重现期为 100 a)。

(6) 耐久性设计环境类别: I 类。

2.2 设计方案

2.2.1 结构体系

斜拉桥跨径布置为 65 m+75 m+268 m, 独塔双索面结构、塔梁墩固结体系, 主跨采用全钢梁、边跨采用预应力混凝土箱梁, 边墩设减隔震支座和横向限位装置, 辅助墩设球型钢支座, 边墩、辅助墩墩顶设混凝土压重。

2.2.2 主梁设计

主跨钢箱梁(见图 2)采用整箱正交异性板扁平钢箱梁, 全宽 36.5 m(不含风嘴), 道路中心线处梁高 3.3 m, 顶板设 2%横坡, 底板水平。标准节段长度取 12 m, 梁上索距取 12 m。节段吊装施工及支架拼装最大节段质量约 370 t(该节段采用横向分段, 吊装质量控制在 300 t 以内)。主梁钢材均采用 Q345qC 桥梁用结构钢。

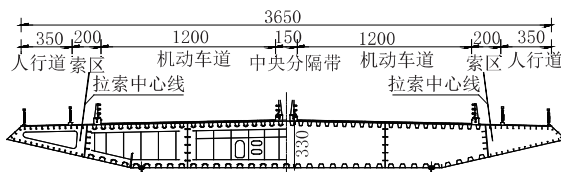


图 2 主跨钢箱梁横断面(单位:mm)

边跨混凝土箱梁(见图 3)采用预应力混凝土单箱 3 室断面, 全宽 36.5 m(不含风嘴), 中心线高度 3.205 m, 顶板设双向 2%横坡, 底板水平, 采用支架分段现浇施工。主梁采用 C55 混凝土, 其中, 为了防止

收稿日期: 2020-09-30

作者简介: 郭济(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

收缩开裂,后浇段采用 C55 钢纤维混凝土。

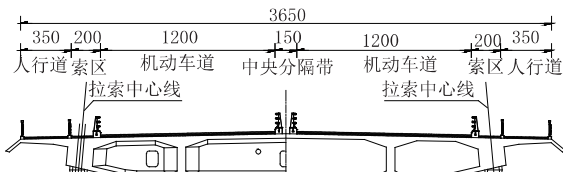


图3 边跨混凝土箱梁横断面(单位:mm)

钢混结合段设在主跨距离主塔 15 m 处,钢混结合段长 5 m,采用有格室的后承压板连接方式。其中,钢箱梁加强段长 3 m,采用带 T 型加劲的 U 肋;钢格室长 2 m,高 800 mm,在格室内填充混凝土,并通过 PBL 剪力键及焊钉共同传递轴力、剪力和弯矩。为了使钢箱梁与混凝土箱梁紧密结合,采用了预应力钢束进行连接。

2.2.3 主塔设计

主塔采用宝瓶型桥塔,总高 151 m,桥面以上约 133.5 m。上塔柱采用单室箱形断面,并设置 2 道上横梁。上塔柱为标准单室箱形截面,断面尺寸为 4.5 m × 7.0 m,下塔柱采用变截面单室箱形截面,截面尺寸从 4.5 m × 7.0 m 变化至 8.0 m × 9.0 m。为保证塔底反力能够均匀传递到主塔承台上,在塔底设置 2 m 实心段。

主塔上塔柱内设置钢锚箱,塔内设置爬梯。主塔在下横梁处与主梁固结,下横梁采用箱形混凝土截面。横梁顶、板内共配置 44 根 $\phi 15.2-19$ 的钢束,腹板内共配置 20 根 $\phi 15.2-19$ 钢束。

主塔基础位于东平水道西侧岸上,采用 18 根 $\phi 3.0$ m 钻孔灌注桩。桩基持力层为微风化砂岩或微风化砂质泥岩。

2.2.4 桥墩基础

边墩、辅助墩结构均采用矩形截面桥墩,边墩立柱间用盖梁连接,盖梁采用预应力混凝土 A 类结构。每个立柱下布置直径 2.0 m 的钻孔桩 4 根。

2.2.5 拉索设计

拉索采用空间双索面布置。塔上索距 2.4 ~ 3.2 m,梁上标准段索距中跨 12.0 m、边跨 6.0 m。全桥共 40 对、80 根斜拉索,拉索水平倾角 $27^\circ \sim 76^\circ$,最长索长 278 m。最大单根拉索吨位约 650 t,安全系数不小于 2.5。

拉索为高强镀锌钢丝,强度为 1 670 MPa,钢丝束外设双层 PE 护套。锚具采用冷铸锚。另外在斜拉索两端安装内置式阻尼器,在索导管出口与拉索结合处加装新型拉索密封系统,该系统由高强度铝合金气囊等构件组成。考虑雨颤影响,PE 护套外表面

设螺纹或凹槽。

综合考虑本桥斜拉索在塔上张拉、索力大小、桥塔造型和尺寸等各方面因素,采用钢锚箱的塔上锚固形式。钢锚箱采用焊接,节段之间采用高强螺栓连接,钢锚箱顺桥向与塔壁之间焊钉连接。

钢主梁锚固采用悬臂式钢锚箱,全焊接的连接方式。混凝土梁锚固在箱梁外腹板底面,设置外凸式锚块,拉索穿过钢导管锚于梁底。

2.3 施工方案

主要施工工艺为主塔爬模施工,主梁悬臂拼装施工。具体步骤如下:

- (1)施工钻孔灌注桩及承台基础。
- (2)主塔下塔柱施工;塔梁固结处 D2 梁段分段浇筑,张拉塔横梁第 1 批横向预应力;斜拉桥边墩、辅助墩施工。
- (3)主塔上塔柱施工;主塔钢锚箱安装;张拉塔内钢锚箱内预应力钢束;混凝土主梁支架搭设、预压。
- (4)主塔封顶;安装钢混结合段的钢箱梁 M1;支架上现浇 D1、D3 梁段及钢混凝土结合段;张拉 D1、D3 梁段内各横梁的第 1 批横向预应力钢束;张拉 D 梁段的第 D-1 批纵向预应力钢束。
- (5)支架上浇筑 A、B、C 梁段;张拉 A、B、C 梁段内各横梁的第 1 批横向预应力钢束;张拉相应梁段的第 A-1、B-1 批纵向预应力钢束。
- (6)支架上浇筑混凝土主梁合龙段;张拉第 2 批纵向预应力钢束;施工南庄岸钢箱梁支架平台。
- (7)陆上段钢主梁 M2 船运到位,通过浮吊吊装滑移到支架平台上;张拉混凝土主梁的 HL0 和 HL0' 横梁的第 2 批预应力钢束;张拉第 1 对斜拉索相应混凝土主梁横梁的第 2 批预应力钢束;张拉第 1 对斜拉索;张拉相应混凝土主梁横梁的第 3 批预应力钢束。
- (8)循环步骤(7)施工,安装其余陆上段钢箱梁;张拉相应的预应力钢束和斜拉索。
- (9)河中段钢箱梁船运到位,桥面吊机吊装就位;张拉相应混凝土主梁横梁的第 2 批预应力钢束;张拉第 n 对斜拉索;张拉相应混凝土主梁横梁的第 3 批预应力钢束。
- (10)循环悬臂施工架设河中段钢箱梁;每拼装 1 段钢箱梁,张拉相应混凝土主梁横梁的第 2 批预应力钢束;成对张拉相应的斜拉索;张拉相应混凝土主梁横梁的第 3 批预应力钢束。

(11)拼装最后一段钢箱梁;陆上段采用轨道滑移,支架上提升就位钢箱梁;张拉相应混凝土主梁横梁的第2批预应力钢束;成对张拉相应的斜拉索;张拉相应混凝土主梁横梁的第3批预应力钢束;主跨合龙。

(12)拆除支架;桥面系及附属工程施工;斜拉索索力调整;成桥运营。

3 静力分析

3.1 分析模型

采用大型有限元分析软件 Midas/Civil 对全桥进行分析。在实际建模分析过程中,对于主梁、桥墩、桥塔采用三维梁单元模拟,斜拉索采用只拉桁架单元模拟,各个构件截面特性按照结构实际尺寸进行取值。整个结构计算模型共有 839 个节点,740 个单元。

结构边界条件根据结构实际情况分别进行模拟(见图4),其中:

- (1)斜拉索锚点与梁、塔间采用主从连接。
- (2)钢梁、混凝土梁间采用刚臂连接。
- (3)塔梁固结。
- (4)承台底固结。

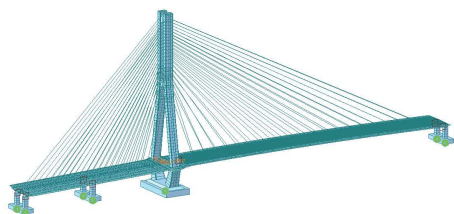


图4 结构计算模型

3.2 合理成桥状态

斜拉桥属高次超静定结构,成桥阶段的内力和线形较大程度上取决于斜拉索的索力^[3]。因此,为使斜拉桥在成桥阶段能处于一个相对合理的成桥状态,有必要对其成桥索力做一定的优化。与常规对称布置的独塔斜拉桥相比,本桥在静力优化过程中尚需特别考虑桥跨布置的不对称特性。目前,常用的斜拉桥索力优化方法大致可以分为以下4类:指定状态法、无约束优化法、有约束优化法以及影响矩阵法^[4]。

本桥求解过程中,在确定斜拉桥结构布置、压重等基本信息后,施加结构自重和压重等外荷载并作一次落架线性计算。过程中通过改变构件的刚度来改变相应内力的分配,并调整压重等参数直至结构整体受力良好。此时所得内力就是弯曲能量最小时的成桥内力,可将其作为斜拉桥成桥合理状态,该过

程实际上是索力优化影响矩阵法的简化方法。

3.3 施工阶段静力分析

经分析,各施工阶段的结构应力均满足规范要求。其中:

(1)混凝土塔、梁正应力值均满足《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)第7.2.8条规定。

(2)钢梁应力值均满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第3.2.1条的规定,小于270 MPa的钢材强度设计值。

部分施工阶段的静力分析结果见图5、图6。

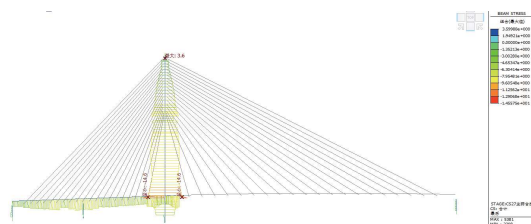


图5 主跨合拢阶段混凝土塔、梁正应力(单位:MPa)

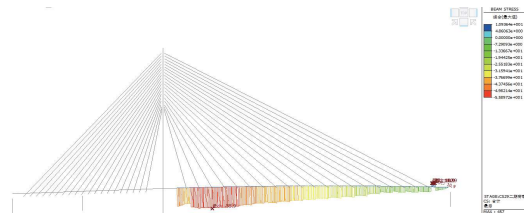


图6 成桥状态钢梁正应力(单位:MPa)

3.4 成桥阶段静力分析

经分析,成桥阶段的结构应力均满足规范要求。其中:

(1)成桥阶段混凝土塔、梁根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)第6.3.1条规定,按照A类预应力构件设计标准对主梁进行验算。在频域效应组合下,截面上下缘均未出现拉应力,截面最小压应力约0.1 MPa;准永久效应组合下,截面上下缘均未出现拉应力,截面最小压应力约0.9 MPa,均满足上述规范要求。

(2)成桥阶段钢梁根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第3.2.1条的规定,主梁最大拉应力117 MPa、最大压应力73 MPa,均小于270 MPa的钢材强度设计值,满足上述规范要求。

部分成桥阶段的静力分析结果见图7、图8。斜拉索方面,根据《公路斜拉桥设计细则》(JTG/T D65—01—2007)第3.4.1条,运营阶段斜拉索的安全系数不应小于2.5。由分析结果可知,本桥拉索最大应力能满足要求。拉索最大应力幅为137 MPa,小于本桥拉索应力幅允许值200 MPa,满足要求。

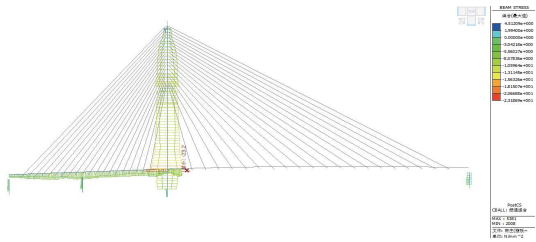


图 7 成桥阶段混凝土塔、梁频遇组合应力(单位:MPa)

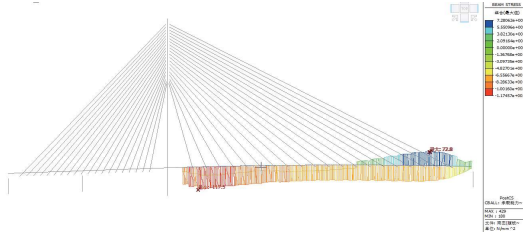


图 8 成桥阶段钢梁基本组合应力(单位:MPa)

位移方面,汽车荷载作用下主梁最大竖向位移为 338 mm(见图 9),小于主梁跨径的 1/500。主塔最大水平位移为 105 mm,约为塔高度的 1/1 457。

此外,通过合理调整索力和适当压重,标准组合下支座均保有一定压力储备,其中主跨边墩 162 t,边跨过渡墩 180 t,边跨边墩 277 t。

3.5 静力稳定性分析

分析了成桥状态下全桥结构的稳定性,结构 1

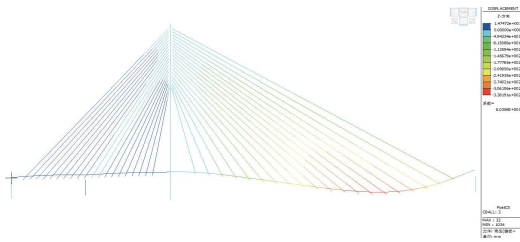


图 9 活载作用主梁最大竖向位移(单位:mm)

阶失稳模态为主塔横桥向侧弯,1 阶弹性稳定系数为 22,满足规范要求。

4 结 语

本文介绍了佛山市南庄大桥的结构体系和施工方案,研究得到该桥合理的成桥状态,并在此基础上给出施工状态和成桥状态下的静力分析结果,对结构的整体稳定安全性进行评估。

参考文献:

[1] 马坤全.大跨径斜拉桥建设与展望[J].国外桥梁,2000(4):60-65.
[2] 刘士林,王似舜.斜拉桥设计[M].北京:人民交通出版社,2006:1-5.
[3] 颜东煌.斜拉桥合理设计状态确定与施工控制[D].长沙:湖南大学,2001.
[4] 梁鹏,肖汝诚,张雪松.斜拉桥索力优化实用方法[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(11):1270-1274.

(上接第 67 页)



图 6 处治后路面效果之实景

(3)对于已经形成的裂缝可根据裂缝形成原因采用注浆加固路基、灌缝、贴抗裂贴、加铺上面层等处治措施,可阻碍裂缝的进一步发展。

(4)从对 G215 国道路面裂缝形成的思考,以及处治措施,可以借鉴到其他沙漠戈壁公路裂缝处治中去,为同类项目提供思路。

参考文献:

[1] 薛明,张俊.沙漠地区沥青路面裂缝的防治技术[J].城市道桥与防洪,2007(3).
[2] 殷源蔚.高速公路盐渍土地基的常见病害及防治处理[J].福建质量管理,2019(15).
[3] 张俊,薛明,李勇,白利荣.基于盐渍土环境的路面裂缝处治技术[J].公路交通科技(应用技术版),2007(9).
[4] 龚晓南.地基处理手册(第三版)[M].北京:中国建筑出版社,2008.