

空间倾斜双肢圆拱塔钢—混结合段设计

熊桂开, 陈翰新, 谭双全, 胡奇

(重庆市勘测院, 重庆市 400020)

摘要:斜拉桥桥塔钢—混结合段构件较多, 受力状态极为复杂, 是索塔受力的关键部位, 因此有必要采取有效措施并进行局部应力分析。该文以某索辅梁斜拉桥空间倾斜双肢圆拱塔钢—混结合段为研究背景, 采取3项设计措施保证结合段受力。利用Midas/Civil建立空间杆系模型, 进行整体分析。采用Ansys建立钢—混结合段三维实体局部模型, 提取整体模型杆件内力, 再作为外力施加到局部模型中分析结合段钢板和混凝土的受力性能。结果表明: 钢—混结合段变形较小, 钢结构处于弹性工作状态, 混凝土主拉与主压应力水平较低, 验证了3项措施的有效性。

关键词: 索辅梁桥; 拱形桥塔; 钢—混结合段; 空间受力; 有限元分析

斜拉桥桥塔一般采用混凝土或钢两种材料, 已建的绝大多数斜拉桥采用混凝土桥塔。近年来, 随着桥梁技术的不断发展, 钢混结合体系桥塔越来越多地应用于斜拉桥建设中。钢—混结合桥塔具有减轻塔身自重、容易保证钢锚箱的安装精度、降低塔柱顶部施工难度、简化斜拉索锚固、明确索塔受力、降低地震作用等优点。2005年建成的南京长江三桥采用钢混结合桥塔, 塔柱为钢结构, 塔墩为混凝土结构。结合段的设计是钢混结合桥塔设计的关键, 应满足传力和连接的功能要求。钢混结合段一般要承受轴力、剪力和弯矩的作用, 弯矩可以分解为受压侧的压力与受拉侧的拉力组合作用。钢混结合段通常采用开孔板连接件(PBL), 指在钢板适当位置开孔, 将钢筋穿过开孔, 由此实现钢筋混凝土结构和钢结构的整体受力。

钢混结合主塔应用广泛, 结合段是桥塔刚度过渡段。如南京长江三桥为直塔结构, 该桥索塔采用上塔柱全钢、下塔柱混凝土的钢—混凝土混合索塔形式, 该钢—混结合段主要采用PBL剪力键作为主要剪力键, 在无法设置该措施的位置采用栓钉作为剪力键; 福建三明台江大桥为直塔, 索塔为拱形钢箱结构, 桥面以下的拱座为混凝土结构, 钢塔与混凝土拱座的连接采用钢—混结合段的方式, 为增加结合段处的刚度和可靠性, 钢塔锚座四周设置精轧螺纹钢筋锚固, 在塔的应力较小侧设置钢绞线; 沈阳浑河三好桥为双拱塔结构, 拱塔为钢结构, 拱座采用混凝土, 拱塔和拱座的连接采用钢—混凝土结合段的方式, 其连接是单肢钢构件和混

凝土构件的整断面结合, 受拉侧采用预加应力的方式来保证钢拱上内力平衡传递到混凝土基座上。

该文设计的桥塔为空间倾斜双肢圆拱塔结构, 均有别于上述桥梁, 其钢—混结合段承受较大的轴力和弯矩, 混凝土和钢板的受力机理不明确, 应力分布复杂, 因此, 必须采取可靠的设计措施确保结构安全, 并建立精细钢—混结合段三维实体有限元模型, 分析其在各最不利工况下的受力情况。

1 问题描述与应对措施

大桥为索辅梁拱塔斜拉桥, 采用双索面, 斜拉索在梁上锚固于箱梁两侧横肋的边缘位置。拱塔正立面外观呈类椭圆形, 全高60.09 m, 其中上塔柱(桥面标高以上部分)高38.89 m; 主塔纵向分A、B两肢, 拉索锚固于拱塔A肢, A、B两肢均为箱形截面, 两者依靠系梁连接。拱塔结构形式分为两部分, 即下塔柱混凝土段和上塔柱拉索区钢拱塔柱段。从塔顶沿桥塔轴线方向往下35.09 m范围内采用钢结构, 自承台顶至以上25 m部分的桥塔采用混凝土结构。桥塔混凝土部分采用C50混凝土, 钢拱塔A及钢拱塔B均采用Q345qD钢材(腹板采用Q345qD-Z25), 板厚20~40 mm(图1)。

拱塔斜拉桥钢混结合段采用PBL剪力键连接, 常规桥梁的主塔多为直塔, 或是单肢钢构件和混凝土构件的整断面结合, 在受力上相对较简单。该桥采用空

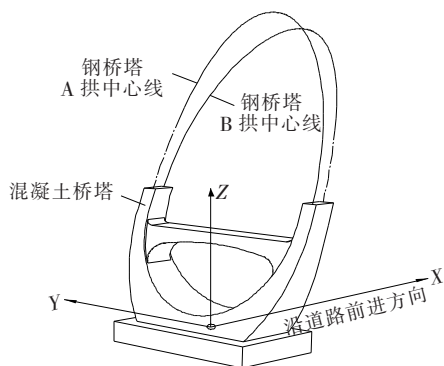


图 1 桥塔示意图

间倾斜双肢圆拱塔,两肢钢拱在同一截面处与混凝土构件结合。由于主塔是双肢空间倾斜的圆形钢构件,在自重、索力等荷载的复合作用下,两肢钢拱均存在较大的轴力和纵横向弯矩,这就使得两者与混凝土底座的结合段受力更复杂。

针对双肢空间倾斜拱塔钢桥塔与混凝土底座的结合段受力复杂的问题,采取如下 3 项设计措施,以保证该结合段受力:① 在结合段钢板上开设直径为 80 mm PBL 剪力键孔洞,贯穿直径为 25 mm 的钢筋(图 2);② 在钢拱塔与钢混结合段相接处设置钢锚管、锚管连接板、锚垫板和结合面锚板等构件,以保证钢混接头处传力均匀(图 2、3);③ 在钢拱与混凝土拱脚之间的连接,配置预应力,保证钢混接头在各种内力组合下全截面受压,根据受力要求,A、B 肢拱塔与混凝土段各采用 8 束 $13\phi^{s}15.2$ 的预应力钢绞线连接。

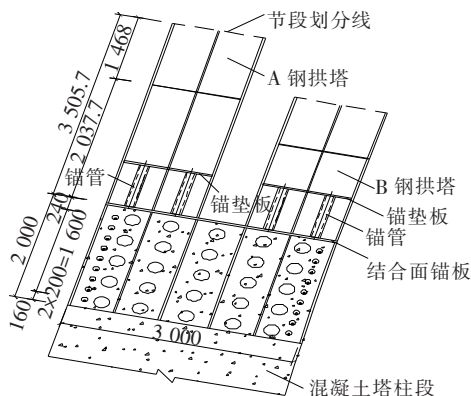


图 2 钢混接头立面图(单位:mm)

混凝土段截面尺寸为 $3.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 的矩形, 钢结构段两肢截面相同, 外形尺寸均为 $1.2\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ 矩形箱。钢混结合段长 2.0 m , 预应力锚管长 0.8 m 。拱肋顶底板和腹板的钢板均厚 3 cm , 加劲肋钢板厚 2 cm , 结合面锚板厚 4 cm , 锚垫板厚 3 cm , 锚管采用壁厚 2 cm , 外径 133 mm 的圆管, 锚管连接板厚 2.4 cm 。

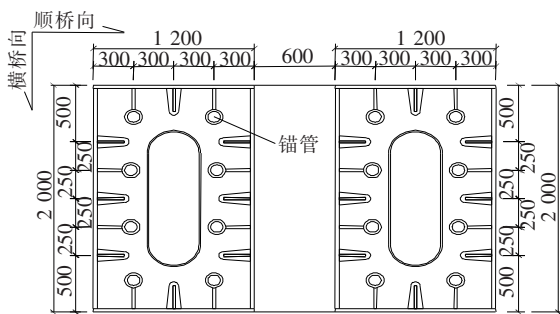


图3 钢混接头横断面图(单位:mm)

2 有限元模型建立

在保证分析精度的前提下,为了提高计算效率和成本,先采用 Midas/Civil 建立全桥空间杆系模型,获得桥塔钢-混结合段的内力,然后采用 Ansys 建立有限元实体模型进行局部应力分析。

2.1 全桥整体计算模型

整体分析有限元模型中桥梁的主要部位都进行准确反映,包括索塔、主梁、斜拉索和桩基承台,几何形状反映桥梁最终采用的线形,结构刚度和截面特性、结构质量和非结构质量均得以准确反映,以便合理分析结构系统实际力学行为。为详细分析主梁在各工况下的受力情况,建立了如图 4 所示空间模型,模型包括 445 个单元,457 个节点。考虑的荷载有恒载,汽车、人群荷载,温度荷载,风荷载,沉降等。根据有关规范对各种荷载工况进行组合,确定局部分析模型的最不利荷载工况组合。

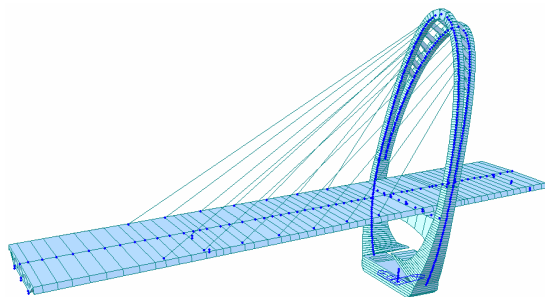


图 4 全桥杆系模型

2.2 局部分析模型

采用 Ansys 建立局部分析有限元实体模型。钢-混结合段长度为 2 m, 根据圣维南原理, 为避免边界条件对所研究段的影响, 局部模型截取钢-混结合面以下 4.0 m, 以上 2.0 m 的范围, 按实际几何尺寸建立混凝土和钢结构模型。建模时按照钢板的位置划分实

体,然后分割网格,形成单元,模型共计 288 610 个单元,276 647 个节点。混凝土均采用 Solid 单元,钢板均采用 Shell 单元模拟。预应力按 $0.75f_{pk}=1\,395\text{ MPa}$ 的永存应力考虑,每束均为 $\phi^s\,15.2-13$ 根,单束换算集中力为 317.4 kN。

为保证边界条件与设计一致,钢—混结合段实体模型,混凝土结构下端采用固结约束,实现位移边界条件,钢结构顶部两肢均采用刚性面域约束,在中心处施加来自整体模型的内力,实现力的边界条件。

从 Midas/Civil 整体模型中提取出杆件内力,再作为外力施加到相应局部模型中。为保守起见,取所有各内力组合包络图中的最值进行验算,以轴力最大和最小以及纵向弯矩和横向弯矩均最大考虑两种情况,即:① 轴力最大+弯矩最大;② 轴力最小+弯矩最大。各荷载取值见表 1。

表 1 整体模型中的杆件包络最值内力

拱	轴力/kN		弯矩 Max/(kN·m)	
	Max	Min	纵向	横向
A 拱	-3 934.5	-2 956.7	4 348.7	-4 747.0
B 拱	1 859.5	1 317.6	5 246.8	-2 596.7

3 受力分析结果

按照表 1 的工况,计算得到钢—混结合段钢结构和混凝土的变形与应力。

3.1 轴力最大+弯矩最大

由计算结果可得:

(1) 轴力最大+弯矩最大情况下混凝土最大变形为 1.3 mm,钢结构(仅显示锚垫板、锚管和锚管连接板)最大变形为 2.2 mm。

(2) 轴力最大+弯矩最大情况下钢结构最大应力为 267.0 MPa,小于 Q345qD 钢设计值 275 MPa。

(3) 轴力最大+弯矩最大工况下混凝土最大拉应力为 6.7 MPa,并且最大拉应力仅分布在锚管周边极小的区域内,整体上钢混结合段及其下方混凝土均处于受压状态。该区域计算应力过大是因为在壳单元与实体单元相接时,软件忽略了板件厚度的影响;另外,两者共节点,应力更易集中,故计算的局部拉应力偏大。事实上,该区域混凝土配置有密集的加强钢筋网,在钢筋的加强下应力必将均匀扩散,因此实际应力将

小得多。轴力最大+弯矩最大情况下混凝土最大压应力为 22.0 MPa,小于 C50 混凝土抗压强度设计值 22.4 MPa。

3.2 轴力最小+弯矩最大

由计算结果可得:

(1) 轴力最小+弯矩最大情况下混凝土最大变形为 0.9 mm,钢结构(仅显示锚垫板、锚管和锚管连接板)最大变形为 1.9 mm。

(2) 轴力最小+弯矩最大情况下钢结构最大应力为 253.0 MPa,小于 Q345qD 钢设计值 275 MPa。

(3) 轴力最小+弯矩最大情况下混凝土最大拉应力为 5.9 MPa,并且最大拉应力也仅分布在锚管周边极小的区域内,整体上钢混结合段及其下方混凝土主要处于受压状态。计算应力过大的原因也是因为壳单元软件忽略了板件厚度的影响,加之壳单元和实体单元共节点,从而出现应力更易集中现象。轴力最小+弯矩最大情况下混凝土最大压应力为 17.4 MPa,小于 C50 混凝土抗压强度设计值 22.4 MPa。

3.3 钢—混结合段剪力

按表 1 的工况,双肢圆拱塔(A 拱、B 拱)存在轴力差,根据总体计算结果提取钢混结合段纵向剪力包络图,得到最大剪力为 415.5 kN,最小剪力为 275.0 kN,结合钢—混结合段钢结构和混凝土变形与应力结果可知结构受力满足要求。

4 结论

(1) 空间倾斜双肢圆拱塔钢—混结合段受力复杂,是索塔受力的关键部位,局部效应明显,故进行节段模型分析是必要的,并应较准确地模拟边界条件和受力工况。

(2) 计算结果表明:通过设置剪力键以及分肢施加预应力,桥塔钢—混结合段各构件应力水平较小,混凝土主要处于受压状态,最大压应力满足规范要求;钢结构处于弹性工作状态,未出现屈服,说明该文采用的 3 种设计措施是合理有效的。

(3) 钢—混结合段在最不利荷载工况下整体变形较小,且变形均匀过渡,表明钢—混结合段刚度设计合理。

参考文献:

[1] 肖林,叶华文,卫星,等.斜拉桥桥塔钢—混结合段的力学行为和传力机理研究[J].土木工程学报,2014(3).

宜兴市范蠡大桥方案设计

龚俊虎¹, 秦世强²

(1. 中铁磁浮交通投资建设有限公司, 湖北 武汉 430060; 2. 武汉理工大学)

摘要: 该文以范蠡大桥为例, 在满足桥梁交通功能和结构受力要求的前提下, 结合宜兴城市特点、文化背景和景观要求, 体现其结构形式新颖美观, 提出了两个主桥设计方案, “竹海虹桥”中承式竹节形折线钢管拱桥和“茶芽拱”下承式斜拉拱组合桥, 使得桥梁建筑与周围环境融为一体。同时, 介绍了两个方案的文化元素、桥梁结构总体设计及拟采用的施工方案。

关键词: 桥梁造型; 方案设计; 桥梁景观; 竹节形拱; 折线钢管拱桥; 斜拉拱组合桥

随着社会的进步与发展, 大众生活水平不断提高; 为了满足人们的审美需求以及城市发展的需要, 桥梁已不再只是单独满足交通要求的结构工程, 桥梁造型与景观要求所占比重在不断提高。桥梁往往发展成为一个城市的地标性建筑, 旧金山的布鲁克林大桥, 已经成为旧金山湾的门户, 每年吸引着成百上千万的游客; 澳大利亚的悉尼港大桥为澳大利亚最著名的景点和标志性建筑之一。设计是工程的先导, 桥梁方案设计从整体上决定了桥梁工程的使用性能。桥梁工程方案设计的失误和不足将造成巨大的损失, 这种损失在随后的详细设计阶段和施工阶段以及运营阶段都难以弥补, 桥梁设计方案要与各方面的功能相衔接, 应以技术性、经济性以及社会性为主, 同时在整个的规划方案上都要与周边的交通组织、规划风格、绿化措施等方面

相融合, 还要考虑施工方便, 技术标准等要求, 因此从美观要求和结构使用要求两方面看, 桥梁方案设计变得越来越重要。该文从桥梁所处位置与文化特色出发, 以范蠡大桥为例, 兼顾桥梁的交通功能要求和景观要求, 提出两种桥梁方案设计。

1 工程概况

宜兴位于江苏省南端的太湖西岸, 苏浙皖三省交界的沪宁杭大交通中心, 是长江三角洲的一颗璀璨明珠。宜兴素以“陶的古都、洞的世界、竹的海洋、茶的绿洲”著称, 既有现代时尚的气派, 又有江南古镇的内蕴和婉约。宜兴市区内现有桥梁形式主要以常规的拱桥、连续梁、简支梁桥等桥型为主。该文考虑范蠡大桥

- [2] 卫星, 强士中. 斜拉桥桥塔钢—混凝土结合段传力机理试验研究[J]. 工程力学, 2013(1).
- [3] 张西丁, 石雪飞. 拱塔斜拉桥桥塔钢—混结合段空间受力分析[J]. 交通科学与工程, 2013(6).
- [4] 李达. 钢—混凝土塔座预应力结合段受力性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2014.
- [5] 刘昌崑. 混凝土箱梁钢混独塔斜拉桥分析和塔柱钢混结合段详细应力分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2014.
- [6] 聂建国. 钢—混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [7] 张勇. 南京长江第三大桥桥塔钢混结合段结构特性研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2002.

- [8] 史建三, 任国雷, 刘安双. 拱、梁与索结合的新创意—福建省三明市台江大桥设计[C]. 第十八届全国桥梁学术会议论文集(上册), 2008.
- [9] 任国雷, 马振栋, 刘国祥. 沈阳浑河三好桥总体设计与施工[C]. 第十九届全国桥梁学术会议论文集(上册), 2010.
- [10] 龙佩恒, 路泽超, 侯苏伟. 钢—混凝土叠合梁独塔斜拉桥塔墩固结区应力分析研究[J]. 中外公路, 2018(1).
- [11] 刘文会, 邹得金. 组合—混凝土混合连续梁桥接头 PBL板抗剪受力分析[J]. 中外公路, 2016(2).
- [12] JTG D60—2015 公路桥涵设计规范[S].
- [13] 黄力, 刘志权, 石雪飞. 大跨径斜拉桥塔墩梁固结处空间受力分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012(3).