

钢管桁架人行景观桥的设计

赵中岩

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司桥梁工程所, 四川 成都 610072)

摘要: 兼顾轻盈、通透、简洁明快的景观要求,同时满足跨径较大、梁高较小、平曲线半径较小、处于高地震区,以及地质条件较差等诸多限制条件,在景观人行桥的设计中采用钢管桁架结构(部分构件采用钢管混凝土加强)。通过对某公园内一座管桁式人行桥的设计,给出了合理的结论,并进行了部分参数的敏感性分析,希望为今后同类型景观桥梁的设计提供参考。

关键词: 景观要求;人行桥;钢管桁架结构;参数敏感性;设计

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)11-0076-04

0 引言

随着社会经济的快速发展,城市人行桥梁越来越重视美观性,要求具备轻盈、通透、简洁明快的特性,但往往受跨径、梁高、线形等设计条件的制约,又要求结构充分发挥材料的特性,满足质量轻、强度高、刚度大等力学性能。

由于钢管桁架结构能够兼顾上述景观要求的同时满足力学性能,因此人行景观桥设计中多采用钢管混凝土桁架结构,充分发挥钢材的高强特性,同时利用桁架杆件全截面受力,就成了一种不错的选择。

1 工程概况

某公园内景观轴项目中的桥梁工程,自地下广场开始,横跨两条市政河流、一条沿河市政道路,成为公园东西区地下广场、景观塔、河边栈桥、地下车库等节点的连接纽带。由于本桥跨越市政道路,同时又要与地下工程协调,桥梁最大跨径 36 m,多数桥跨小于等于 15 m,就要求梁高尽可能小、全桥的梁高变化尽可能平顺。由于本桥平面线形呈发散的螺旋状,在线路起始段平曲线半径不到 30 m。地勘资料显示,桥位处于河道冲积扇区域,附近及其外围地区发生过多中、强破坏性地震,对工程场地均造成了不同程度的影响,桩基应考虑土层液化效应折减。基于以上诸多限制条件,该人行桥的设计摒弃了通常所用的钢箱梁,采用了上部结构更轻的钢管桁架

结构。

本文通过对管桁式人行桥的计算,给出了合理的结论,并进行了部分参数的敏感性分析,希望为今后同类型桥梁的设计提供参考。

2 设计标准

该桥梁属城市公园内专用人行桥梁。

(1)桥梁结构设计安全等级:一级。桥面宽度:变宽 2.0~6.67 m。

(2)设计洪水频率:1/100 a。

(3)设计荷载:

a. 人群荷载:按《城市桥梁设计规范》取值。

b. 抗震设防标准:抗震基本烈度为 9 度,地震动峰值加速度为 0.40g,特征周期为 0.45 s,抗震设防类别为丁类。

3 设计标准

该桥分为五联,采用 $(14+3\times 12)m+(30+36+30)m+(4\times 15)m+(3\times 15)m+(3\times 14+12)m=305\text{ m}$ 的布置。桁架通高 0.9m,桥面布置为 0.4 m 钢栏杆 +3.2~5.9 m 人行道 +0.4 m 钢栏杆。

第二联成为全桥的控制联,其曲线半径较小,仅为 30 m,但跨径最大,为 36 m。本文仅对第二联 $(30+36+30)m$ 进行研究。

第二联由上弦杆、下弦杆、腹杆、横梁、纵梁等组成,桁架高度为 0.9 m,宽度为 3.6 m,纵向节间距平均值 3.6 m,桥面布置为 0.4 m 钢栏杆 +3.2 m 人行道 +0.4 m 钢栏杆。钢管均采用 Q345C 材质,填充混凝土 C40,构件规格详见表 1。

收稿日期:2022-11-23

作者简介:赵中岩(1981—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

表 1 第二联钢桁架构件规格

序号	构件名称	规格 /mm	说明
1	上弦杆	245×16 钢管	
2	下弦杆	325×16 钢管	钢管混凝土
3	腹杆	203×16 钢管	
4	拉压杆	168×10 钢管	上平联横联杆(横杆、斜杆)
5	横梁	I10 工字钢	纵桥向间距 1.5 m
6	桥面	空心塑木桥面板	定制

桁架横断面呈倒三角形,如图 1 所示。该结构是在常规上承式钢桁架的基础上将两片主桁的下弦杆退化成一根,取消了下平纵联,并将上弦杆间距适当拉开,在增强了桁架横向刚度的同时,使桁架高度满足设计要求,并满足景观轻型化的要求。该结构在纵向及横向上均采用稳定的“三角形”构造,造型简洁,力学概念清晰,自重较轻而结构刚度较大^[1]。

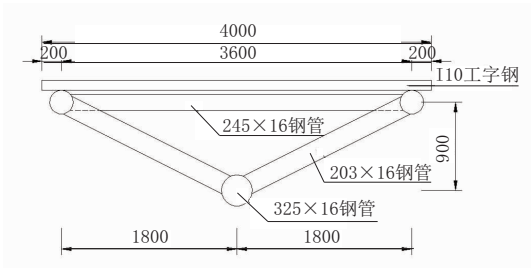


图 1 第二联横断面(单位:mm)

桥墩采用钢管混凝土结构^[2-3],中墩采用双 Y 形墩,上端顺桥向分叉;边墩采用树形墩(即将单 Y 形墩直柱延伸到顶)。其中,直柱采用 600×16 钢管混凝土结构,斜肢采用 450×16 钢管混凝土结构^[2-3]。

4 结构分析

4.1 建模与假定

采用 Midas Civil 2021 有限元程序建模。所有构件按照桁架单元进行建模计算,节点采用刚性节点。桁架和桥墩采用固结,墩底固结。桥梁模型如图 2 所示。

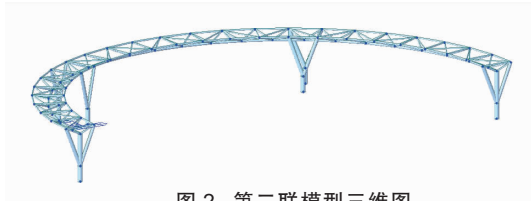


图 2 第二联模型三维图

4.2 应力分析

静力计算考虑的荷载主要有结构自重、二期恒载 1.57 kN/m²、人群荷载 4.232 kN/m²、整体升温 30°,整体降温 30°。上弦杆单侧单独升温 15°,下弦杆单独升温 15°。

由表 2 可知,各杆件的应力均能满足规范^[4]要求。

表 2 第二联钢桁架应力验算

序号	构件名称	最大应力 / (N·mm ⁻²)	设计值 / (N·mm ⁻²)	利用率 /%	结论
1	上弦杆	131	310	42.3	满足
2	下弦杆 (空心段)	163	310	52.6	满足
3	腹杆	-144	310	46.5	满足
4	拉压杆	-149	310	48.1	满足
5	下弦杆 (钢混段)	-172	310	55.5	满足

4.3 挠度分析

由图 3 可知,人群荷载产生的挠度为 44.0 mm,小于 $L/800=45$ mm,满足规范^[5]的要求。由图 4 可知,桁架标准组合下最大挠度为 98 mm,大于 $L/1\ 600=19.4$ mm,应设置预拱度。

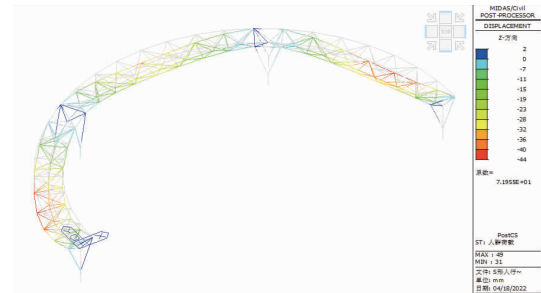


图 3 人群荷载产生的挠度(单位:mm)

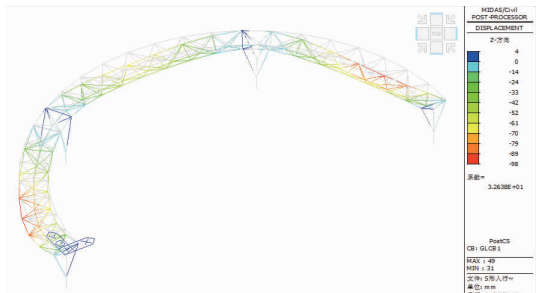


图 4 标准组合产生的挠度(单位:mm)

4.4 杆件长细比分析

杆件应进行长细比分析,避免局部失稳。结果见表 3、图 5。

表 3 第二联钢桁架构件长细比验算

序号	构件名称	回转半径 <i>i</i> /mm	计算长度 <i>l</i> ₀ /mm	长细比	限值	结论
1	上弦杆	66	4 186	63.4	150	满足
2	下弦杆(空心段)	109	3 924	36.0	150	满足
3	腹杆	66	2 990	45.3	150	满足
4	平联压杆	56	4 009	71.6	150	满足
5	平联拉杆	56	5 604	100.1	250	满足
6	下弦杆(钢混段)	81.25	3 924	48.3	—	无判别

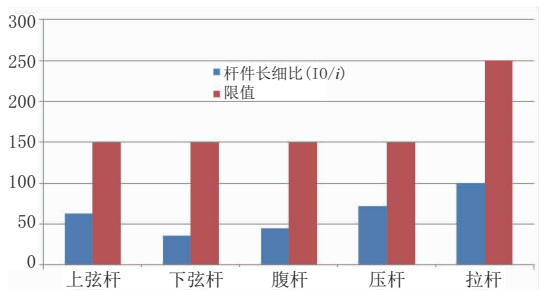


图 5 杆件长细比验算

由表 3、图 5 所示结果可知,各杆件的长细比均能满足规范^[4]要求。

4.5 动力分析

桁架结构自重较小,活载与恒载的比值相对较大,因此动力特性分析尤其重要。根据规范^[5]第 2.5.4 条规定:为避免共振,减少行人不安全感,竖向自振频率不应小于 3.0 Hz。

由表 4、图 6、图 7 可知,前 4 阶阶振型主要表现为横向振动,其频率为 1.86~2.73 Hz,均在横向敏感频率 0.5~1.2 Hz 范围^[6]之外;第 5 阶振型主要表现为竖向振动,其频率为 3.32 Hz,不仅在竖向敏感频率 1.6~2.4 Hz 范围^[6]之外,还满足规范^[5]的规定。

表 4 第二联钢桁架前 5 阶振型及频率

振型序号	频率 /Hz	振型名称	振型描述
1	1.86	1 阶对称横弯	桁架整体横向对称弯曲
2	2.10	1 阶反对称横弯	桁架整体横向反对称弯曲
3	2.51	2 阶反对称横弯	桁架整体横向反对称弯曲
4	2.73	2 阶对称横弯	桁架整体竖向对称弯曲
5	3.32	1 阶竖弯	桁架整体竖向对称弯曲

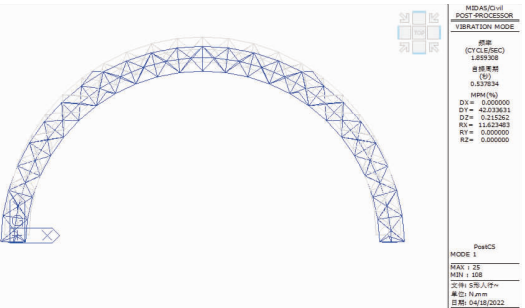


图 6 1 阶对称横弯



图 7 1 阶竖弯

4.6 稳定性分析

桁架结构轻盈,杆件细长,除了长细比控制的杆件局部稳定要求外,应进行整体稳定性验算。根据分析结果(见图 8),1 阶屈曲模态表现为桥墩失稳,恒载基础上相对于人群荷载的稳定性系数为 90.8,满足稳定性使用要求^[7](第一类稳定,安全系数不小于 4)。

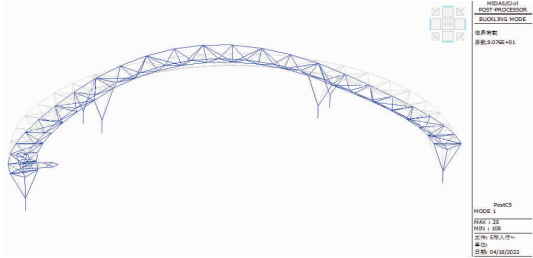


图 8 1 阶屈曲模态

5 用钢量比较

第二联钢桁架同比用钢量比较见表 5。

表 5 第二联钢桁架同比用钢量比较

上部结构	用钢量 Q345C/kg	比较结果
钢箱梁(比较方案)	202 491.6	作为基准 100%
钢桁架	79 820	占比 39.4%

由表 5 可知,同样宽度、跨度桥型相比,钢管桁架结构用钢量占钢箱梁用钢量的 39.4%,上部结构质量明显减少,更适合高震区及不良地质条件,且节省造价。

6 参数敏感性分析

为了更好地研究本桥的力学特性,现对本联桁架桥部分参数进行调整,研究不同参数对桁架结构的影响。

参数分为四类:荷载类(系统温度、弦杆不均匀温度)、边界类(桥墩刚度、桥墩形式)、弦杆类型(是否灌注混凝土)、桁架尺寸参数(桁高)。

(1)荷载类参数敏感性分析(见表 6)。

表 6 第二联钢桁架荷载类参数敏感性分析

荷载类型	桁架 应力值 / (N·mm ⁻²)	说明
系统升温 30°	-78~30	中墩附近斜腹杆受拉最大,边墩附近平联横杆受压最大,对称扭转
系统降温 30°	-30~78	中墩附近斜腹杆受压最大,边墩附近平联横杆受拉最大,对称扭转
外弦单独升温 15°	-34~4	中跨跨中外弦杆受压最大,边跨扭转变形
内弦单独升温 15°	-34~3	中跨跨中内弦杆受压最大,边跨扭转变形
下弦单独升温 15°	-33~18	边跨中墩附近下弦杆受压最大,中墩附近斜腹杆受拉最大,中跨扭转变形

由表 6 可知,温度变化对曲线桁架结构的应力有较大影响,系统升降温引起的应力最大可占允许应力的 25%。曲线桁架结构通过空间变形进行适应,本桥所采用的曲线桁架结构对温度的适应方式主要是扭转变形。

(2)边界类参数敏感性分析。边界类参数分成两种,一种是桥墩与桁架的连接方式(见表 7),一种是桥墩的构件形式(见表 8)。

表 7 第二联钢桁架边界类参数(连接方式)敏感性分析

序号	边界类型	桁架应力值 / (N·mm ⁻²)	桁架 1 阶 竖向基频 /Hz
1	全部水平向无约束	-177~165	3.29
2	全部固结	-209~163	4.35
3	边墩处水平向无约束中墩处固结	-184~164	3.42
4	中墩处水平向无约束边墩处固结	-202~151	4.29

表 8 第二联钢桁架边界类参数(桥墩形式)敏感性分析

序号	桥墩类型	桁架应力值 / (N·mm ⁻²)	桁架 1 阶竖 向基频 /Hz	桁架挠度 /mm
1	钢管混凝土结构	-172~163	3.36	44.0
2	空钢管(450×16)	-169~163	3.39	48.8
3	空钢管(400×16)	-167~163	3.37	49.5

由表 7 可知,桥墩对桁架约束越强,桁架应力、基频越大;约束越弱,应力、基频越小。提高桁架桥桥墩的线刚度,对提高桁架桥整体的竖向基频是明显的,但同时增大了结构应力,降低了安全度。因此,桥墩的线刚度应该结合应力和基频两个因素综合确定。很多人行桥基频较低,可以通过增大桥墩线刚度增加整体桥梁的自振频率(在上部结构可以利用桥墩刚度的情况下)。

由表 8 可知,本联桁架结构桥墩采用空钢管 φ400×16 即可满足应力和挠度的要求(此时钢管桥墩最大应力 159 N/mm²),桥墩在不考虑桁架挠度的情况下使用空钢管 φ400×16 即可,既节省材料,又可以节省混凝土灌注等施工费用。规范[8]对桁架桥挠度的限值是 1/500(72 mm),远大于规范[5]对挠度的规定。笔者认为,在满足其他指标且应力比不太高(<0.60)的情况下,后者要求过于严格。

(3)弦杆是否灌注混凝土,分析结果见表 9。

表 9 第二联钢桁架弦杆类型敏感性分析

序号	下弦杆类型	桁架应力值 / (N·mm ⁻²)	桁架 1 阶竖 向基频 /Hz	桁架挠度 /mm
1	下弦杆中墩处两个节间灌注混凝土	-172~163	3.36	44.0
2	下弦杆(空钢管)	-268~169	3.12	49.6

由表 9 可知,本联桁架结构中间桥墩附近下弦杆是否灌注混凝土^[2-3],将极大影响下弦杆钢管受压程

度,不灌注混凝土下弦杆的压应力过高,安全系数过低。

(4)桁高变化分析,结果见表 10。

表 10 第二联钢桁架桁高敏感性分析

桁高 /m	桁架应力值 / (N·mm ⁻²)	桁架 1 阶竖向 基频 /Hz	桁架挠度 / mm
0.9	-172~163	3.36	44.7
0.8	-190~180	3.02	56

由表 10 可知,本联桁架结构桁高对桁架应力、基频、挠度影响较大,随着桁高减少,桁架应力有显著增加,基频减少较为剧烈,挠度影响最大。

7 结 论

(1)钢管桁架结构具备轻盈、通透、简洁明快的视觉效果,应对建筑高度受限时有很大的优势,可以充分发挥材料的力学性能,相较于钢箱梁可以大幅节省用钢量,更适合高震区及不良地质条件,且节省造价。

(2)温度变化对曲线桁架结构的应力有较大影响,曲线桁架结构通过空间变形进行适应。本桥所采用的曲线桁架结构对温度的适应方式主要是扭转变形。

(3)桥墩线刚度变化对曲线桁架结构的影响明显,提高桥墩线刚度可以增大桁架的竖向基频,但同时增大了结构应力,因此桥墩的线刚度应该结合应力和基频两个因素综合确定。桥墩是否采用钢管混凝土结构对桁架应力和基频影响不大,对桁架结构的挠度有影响,但使用空钢管桥墩的情况下挠度超限不多,但造价节省明显。

(4)小半径连续桁架结构中墩附近下弦杆受压程度与是否灌注混凝土使之形成整体钢管混凝土截面密切相关,适当长度范围使用钢管混凝土构件显著降低下弦杆钢管的压应力,并且不增加过多投资。

(5)桁高对桁架应力、基频、挠度影响较大。随着桁高减少,桁架应力有显著增加,基频显著减少,挠度影响最大。

参考文献:

[1] 朱高波,童金虎.三角形截面钢管桁架人行桥设计[J].路桥科技,2014(3):246.
[2] JTG/T D65—06—2015,公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
[3] 赵熙元,等.钢管结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
[4] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
[5] CJJ 69—95,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].
[6] 陈政清,华旭刚.人行桥的振动与动力设计[M].北京:人民交通出版社,2009.
[7] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1996.
[8] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].