

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.02.025

丰城市紫云大桥人非系统设计与研究

严 潇

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 丰城市紫云大桥跨江段采用双层桥梁,主梁上层布置双向六车道,下挂人非系统。为确保人非系统同时满足结构的受力和舒适度需求,采用有限元软件进行计算分析,通过设置构造节段缝、弱化节段端部竖杆的连接刚度、优化人非系统杆件施工步骤等措施来保证结构的受力满足要求。同时,通过合理的手段验算结构振动的峰值加速度,保证人非系统的舒适度满足要求。

关键词: 双层桥梁;人非系统;桥梁结构设计;舒适度评估

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)02-0088-03

0 引言

国内双层桥梁早期主要用于铁路或公铁两用桥梁同线过江的情况。近年来,国内一些市内跨江桥梁(如扬州万福大桥、宁波春晓大桥等)开始采用主梁下挂人非系统的形式来同时满足行人和行车的双重需求。对这类桥梁而言,人非系统除了需要满足结构受力外,还应当对结构舒适度进行评估。本文以丰城市紫云大桥工程为背景,简述下挂人非系统的设计与研究成果,可以为类似工程提供借鉴。

1 应用工程背景

丰城市紫云大桥是跨越赣江的一座大型桥梁,包含跨江主桥、水中引桥和南北岸陆上引桥等。跨江段桥梁均采用组合梁,总长约2.3 km。其中,跨赣江主桥桥型方案采用自锚式悬索桥,总长460 m,跨径布置为(60+80+180+80+60)m=460 m。根据项目总体设计方案,跨江段桥梁需满足人非系统过江的需求。人非系统的布置遵循以下原则^[1]:

(1)根据初设批复,跨江段桥梁的横断面宽度31 m,施工图阶段可以优化横断面布置,但不宜突破31 m的宽度。

(2)行车道和人非道的尺寸需满足交通功能,且与两岸接线道路能够衔接。

(3)人非系统的平、纵布置能满足规范要求,保证人非交通的安全、舒适。

(4)人非系统能成为富有特色的景观空间。

收稿日期:2021-04-30

作者简介:严潇(1990—),男,本科,工程师,从事桥梁设计工作。

根据以上原则,跨江段桥梁采用双层桥梁,上层布置双向六车道,下层布置人非通道。人非系统桥面系通过竖杆下挂在上部结构横梁上。跨江段主桥标准横断面布置见图1。

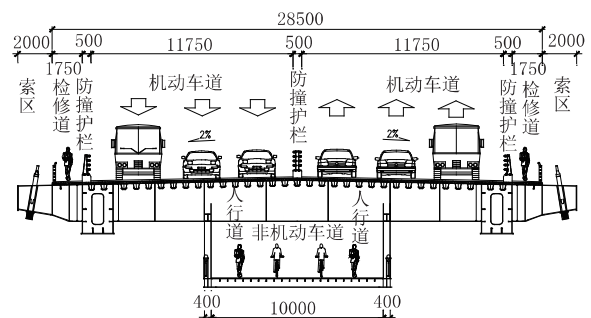


图1 主桥标准横断面(单位:mm)

2 设计难点与对策

对于采用主梁下挂人非系统的桥梁而言,人非系统不是完全独立的体系,其与上层主梁连接,必须考虑桥梁总体受力产生的影响。为了降低下挂人非系统参与桥梁总体受力的程度,需要适当降低人非系统的整体性和刚度。

下挂的人非系统属于轻柔结构,结构的自振频率低,在行人等外界荷载的作用下容易引起大幅度的振动,会给行人带来不适感^[2]。为保证人非系统结构舒适度满足要求,需要提高其与上层主梁的整体性和刚度。

为确保同时满足人非系统结构的受力与舒适度需求,采用有限元软件进行计算分析。首先通过合理的构造和施工措施来满足结构的受力需求^[3],然后对结构的人致振动和行人的舒适度进行评估。

3 人非系统结构设计

以跨江主桥为例,简述人非系统结构设计。人非

系统采用钢结构,由下层桥面系、竖杆和上层小纵梁组成。桥面系标准节段高度 0.5 m,采用 12 mm 钢桥面板,两侧设置两个工字型纵梁,中心距 10.4 m,沿纵梁每隔 4.5 m 设置一道横梁。人非系统桥面系通过竖杆与上层主梁横梁连接。竖杆采用工字型杆件,横桥向与桥面系纵梁位置对应,中心距 10.4 m,顺桥向间距 9 m,竖杆两端均通过节点板与上、下层结构栓接连接,按固结构造处理。为抵抗人非系统给主梁横梁带来的面外受力,在主梁横梁之间设置小纵梁。小纵梁采用工字型杆件,横桥向与竖杆位置对应,中心距 10.4 m。

由于人非系统结构受力需要考虑桥梁总体受力产生的影响,因此采用有限元软件建立全桥的空间杆系模型,见图 2。缆吊系统采用受拉单元模拟,塔墩梁和人非系统均采用梁单元模拟,按实际施工过程进行计算,形成成桥内力,在此基础上进行人非系统结构的受力分析。



图 2 主桥有限元计算模型

人非系统按 3 种方式建模,通过对比结构断缝、人非系统竖杆的锚固连接方式来确定合理的结构构造和施工措施,详见表 1。

表 1 人非系统建模方法对比

模型	结构断缝	竖杆与上层横梁连接方式	竖杆与下层桥面系连接方式
模型一	无	固结	固结
模型二	有	断缝处顺桥向铰接,其余固结	断缝处顺桥向铰接,其余固结
模型三	有	断缝处顺桥向铰接,其余固结	断缝处顺桥向铰接,其余成桥固结,施工过程中铰接

其中,对于模型三的人非系统非断缝处竖杆,与下层桥面系连接方式考虑施工步骤,人非系统安装时按顺桥向铰接模拟,在上层主桥吊索张拉完成后按固结构造模拟。3 个模型的计算结果对比详见表 2。

通过模型一计算结果可知,由于人非系统与主梁连接形成桁架结构,导致其过度参与整体受力,恒载、上层活载引起的结构应力均过大。同时,由于未设置结构断缝,主梁在温度荷载作用下的变形会带动人非系统构件产生较大的应力,造成计算模型一的基本组合下结构应力远超过钢结构强度设计值。

表 2 人非系统计算结果对比 单位:MPa

模型	恒载应力极值	上层活载应力极值	温度荷载应力极值	基本组合应力极值
模型一	137	147	66	664
模型二	105	93	27	354
模型三	68	93	27	273

为降低结构应力,考虑采用一些必要的构造措施。首先,设置足够多的结构缝以保证上、下层无法形成桁架结构参与总体受力。其次,弱化节段端部竖杆的连接刚度,形成铰接,以此减小温度变形的影响。

通过模型二计算结果可知,采取构造措施后,人非系统的杆件应力明显降低。但因为节段中间竖杆的连接方式为固结,导致施工过程中累计的恒载应力依旧偏大,基本组合下结构应力仍高于钢结构强度设计值。为减少施工阶段累计的恒载应力,采用优化竖杆施工过程中连接方式的措施,竖杆与人非系统桥面系连接时按铰接处理,待上层主桥吊索张拉完成后再形成固结。

通过模型三计算结果可知,补充施工措施后,施工过程中累计的恒载应力明显减小,基本组合应力可以满足结构强度要求。根据以上计算分析结果,人非系统具体构造和施工措施如下:

(1)桥面系顺桥向每间隔 3~5 根竖杆设置断缝,将人非系统分割成 27~44 m 长的节段,断缝位置设置伸缩缝。

(2)节段端部竖杆的连接方式由节点板栓接改为叉耳型连接,按铰接构造处理。

(3)优化节段中间竖杆的施工过程连接方式,节点板螺栓分批安装拧紧,竖杆与人非系统桥面系连接时安装第 1 批螺栓但不拧紧,使竖杆下端形成顺桥向铰接。在上层主桥吊索张拉完成后再拧紧第 1 批螺栓,同时安装拧紧其余螺栓,形成固结构造。

4 人非系统结构舒适度分析

本桥下层人非系统属于轻柔结构,对人非桥梁振动舒适度的分析应成为设计的重点。对于主梁下挂的人非系统结构而言,人致振动引起的振动是行人舒适性问题的主要来源。我国现有人行桥规范仅针对竖向振动规定竖向自振频率不小于 3 Hz,针对人非桥梁结构的舒适度分析缺少规范依据。本次设计参考德国《人行桥设计指南》^[4](以下简称“《德国指南》”),采用峰值加速度限值方法来评估人非系统在

行人荷载作用下的结构舒适度^[5]。这种方法的原理是在人非系统结构发生人致振动时,利用其所产生的最大加速度评估人非系统的振动响应,检验在行人荷载作用下的人非系统结构舒适度。

根据施工图实际的人非系统标准节段尺寸,采用有限元软件建立局部模型,见图3。

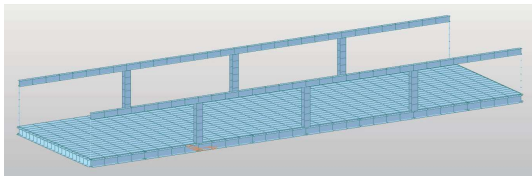


图3 主桥人非系统标准节段有限元模型

通过对模型进行特征值分析,得出结构的第1阶振动模态为侧向振动,频率3.67 Hz。竖向振动发生在第9阶模态,频率6.63 Hz。参考《德国指南》对人非系统结构的振动舒适度进行评估。

《德国指南》中列出了一些重要的设计工况,每个设计工况有一个对应的交通等级和舒适度等级,详见表3、表4。

表3 《德国指南》重要的设计工况说明

设计工况	描述	交通等级	密度 $d(P=行人)$	预计出现	舒适等级
1	桥梁的开通典礼	TC4	$d=1.0 P/m^2$	仅出现一次	CL3
2	通勤往返者	TC3	$d=0.5 P/m^2$	每天	CL2
3	周末的漫步者	TC2	$d=0.2 P/m^2$	每周	CL1

表4 《德国指南》中行人舒适度定义 单位: m/s^2

舒适等级	舒适度	竖向峰值加速度	侧向峰值加速度
CL1	最好	<0.5	<0.1
CL2	中等	$0.5\sim 1.0$	$0.1\sim 0.3$
CL3	差	$1.0\sim 2.5$	$0.3\sim 0.8$
CL4	不可忍受	>2.5	>0.8

本次设计中采用最高交通等级TC4,确定最大人群密度 $d=1.0 P/m^2$ 。

在《德国指南》的设计流程中,所有交通等级的荷载都采用均匀分布的谐波荷载模型,谐波荷载

$$p(t) = P \times \cos(2\pi f_s t) \times n' \psi$$

式中: $P \times \cos(2\pi f_s t)$ 是单个行人的谐波荷载。 P 是单个行人的荷载幅值,竖向 $P=280 N$,侧向 $P=35 N$ 。 f_s 为步频,对于竖向和侧向需分别考虑。竖向振动是由人行走时重心的上下起伏的动力荷载引起,行人正常行走的步频介于1.6 Hz(慢走)~2.4 Hz(快走)之

间。对侧向振动而言,当左脚站立迈出右脚时,侧向力指向左面,反之指向右边。在左右脚各迈出一步后,完成一次循环,所以侧向步频大约是竖向步频的1/2,为0.8~1.2 Hz^[6]。 t 为行人在人非系统上通行的某个时刻。 n' 是等效行人密度。

$$n' = \frac{1.85\sqrt{S \times d}}{S}$$

式中: S 为桥面板面积; d 为最大人群密度。 ψ 为考虑到步频接近频率变化范围临界值的概率而引入的折减系数,保守考虑, $\psi=1.0$ 。

利用有限元软件的时程分析功能,将上述谐波荷载等效为时程函数施加于结构上,计算出在 $p(t)$ 荷载作用下各节点处的加速度幅值,得到结构的最大竖向加速度 $a_{max}=0.24 m/s^2$,最大侧向振动加速度 $a_{max}=0.025 m/s^2$ 。根据表3,可知舒适度级别为CL1。这说明即使在最高的交通等级下,由于人非系统的自振频率远大于行人的正常行走步频,振动不会让人产生不适感,可以满足要求。

5 结语

丰城市紫云大桥跨江段采用双层布置,通过计算分析,采用设置构造节段缝、弱化节段端部竖杆的连接刚度、优化人非系统杆件施工步骤等措施,来保证结构的受力满足要求。同时,通过合理的手段验算结构振动的峰值加速度,保证人非系统的舒适度满足要求。最终设计的下挂人非系统用钢量指标约 $200 kg/m^2$,低于上层主梁的结构用量。由此可见,采用下挂的人非系统不仅能够满足交通及景观需求,还能够节省工程造价。这种桥梁布置形式可以为市内的跨江大桥提供一种新的思路。

参考文献:

- [1] 胡方健. 南昌市朝阳大桥通航孔人非通道结构设计及研究[J]. 中国市政工程, 2014(6):20-23.
- [2] 李超, 李文龙. 桥梁下悬挂人非通道设计及人致振动研究[J]. 中国市政工程, 2020(4):95-97.
- [3] 万鹏, 马磊. 宁波外滩大桥附属人行桥设计[J]. 世界桥梁, 2013(4):5-9.
- [4] RFS2-CT-2007-00033, Design of footbridges guideline [S].
- [5] 马龙宝. 某钢结构人行桥人致侧向振动及舒适度分析[J]. 中国市政工程, 2017(5):8-11.
- [6] 蒋蕾海. 大跨度人行桥的动力分析方法[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2016(4):33-39.