

一种类张弦梁人行桥设计实践

曲 慧, 刘婧姝

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 以一座类张弦梁人行桥为研究对象, 首先介绍了该桥型的设计理念和结构体系, 重点介绍了桥梁的总体设计、关键构件和节点的设计要点, 包括拱形主梁、刚性索、斜杆、斜塔以及刚性索和主梁与斜塔的连接节点等。并建立了有限元模型, 对这种创新的类张弦梁进行受力分析。结果表明, 该桥的各项受力指标均满足要求, 且结构受力合理, 造型轻盈简洁, 具有建筑高度小、耐久性好、维护难度低的优势, 可为今后这种类张弦梁人行桥的应用和推广提供一定的借鉴。

关键词: 类张弦梁; 刚性索; 钢混组合外倾桥塔; 铰接节点

中图分类号: U448.11; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0206-05

Design and Practice of a Beam String-like Pedestrian Bridge

QU Hui, LIU Jingshu

[Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: Taking a beam string-like pedestrian bridge as the research object, the design concept and structural system of this bridge type are introduced. The focus is on the overall design of the bridge and the key design points of its critical structural components and joints, including the arched girder, rigid cables, diagonal rods, inclined pylons, and connection joints between rigid cables, girders and inclined pylons. A finite element model is established to conduct a stress analysis on this innovative beam string-like structure. The results show that all stress indicators of the bridge meet the requirements, the structural stress is reasonable, and the design is light and concise, which has the advantages of small construction height, better durability and low maintenance difficulty, and can provide some references for the application and promotion of such beam string-like pedestrian bridges in the future.

Keywords: beam string-like; rigid cable; steel-concrete composite outward-inclined bridge pylon; hinged joint

0 引 言

张弦梁结构一直被广泛应用于大跨度屋面。谢志涛等^[1]总结出传统张弦梁结构是通过拱形梁或桁架与高强钢丝索组合而成的自平衡体系。由于该体系能充分发挥刚性主梁和柔性拉索两类材料的受力特性, 并通过施加预应力使结构产生反拱, 从而可大大提高结构的刚度; 同时该体系通过设置在高强柔性拉索上的刚性压弯腹杆给主梁在跨中提供弹性支撑, 以及用钢索抵消拱形主梁的拱脚水平推力, 充分发挥两种材料性能, 又可使结构更加轻巧美观。张弦梁结构也有应用于城市景观人行桥的案例^[2-3]。其中万杰龙^[4]设计的典型张弦梁结构应用于深圳前海景观人行桥上, 其单跨跨度达到 108 m, 外部体

系为简支体系。

本文介绍了一种新的类张弦梁结构的设计实践和结构分析。其在传统张弦梁结构的基础上进行改进, 对拱形主梁与柔性拉索的相对位置和柔性拉索的材质进行调整优化。

1 桥型创新与景观设计

该项目在太原市迎泽公园南门外, 是一座上跨南沙河河道的人行桥。规划的南沙河宽度为 34 m, 两侧为既有南沙河快速路隧道。业主要求桥梁景观方案尽量轻盈, 且河内不布置桥墩, 最终创新性地采用了这种类张弦梁体系桥梁。

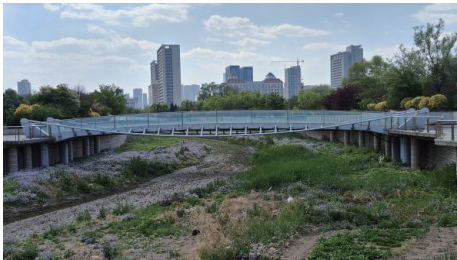
该桥以“拱形主梁和悬垂刚性索”两种几何形态进行创作和演绎。其中拱形主梁为人行走面; 悬垂刚性索在断面上布置在主梁外侧, 竖向布置在高度上与拱形主梁竖向交织, 这种交织减少了结构跨中位置在梁下的建筑高度, 比常规布置的张弦梁在跨

收稿日期: 2025-10-13

作者简介: 曲慧(1984—), 女, 硕士, 正高级工程师, 从事桥梁设计和动力分析工作。

中位置的结构高度更低。在拱形主梁和悬垂刚性索之间用刚性斜杆连接。在靠近支点处,拱形主梁和悬垂刚性索通过梁端的钢混组合结构桥塔连接,在桥面上形成了有一定特色的上部建筑结构。向外倾斜的桥塔与主梁、桥墩刚接,桥墩下接钻孔灌注桩基础,创造出一个动态而稳定的空间,从远处望去视野开阔,主梁仿佛一片轻薄的荷叶,漂浮在水面上。桥型轻盈飘逸,向上拱起的桥面和向下悬垂的刚性索曲线光滑连续,造型独特,景观优美,与周边环境融为一体。

主梁在跨中范围支撑在刚性索之上,在支点范围悬吊在刚性索之下,桥面护栏设计为透明的玻璃,尽可能避免对主梁流线形设计造成干扰。主塔与主梁刚接,刚性索铰接在矮塔柱上;塔柱采用向桥体外倾斜的造型,刚性索与倾斜塔位于同一平面内,从桥体两侧看外倾的斜塔犹如蝴蝶的翅膀,赋予了结构更加灵动和轻盈的感觉。实景桥梁照片如图 1 所示。



(a) 桥梁立面



(b) 桥梁断面

图 1 实景桥梁照片

2 桥梁总体设计

主桥为单跨刚性索类张弦梁结构体系,单跨跨径为 33.6 m,主梁标准断面宽度为 3.5 m,高度为 0.3 m;靠近支点位置与倾斜的主塔固结,断面宽度加宽至 4.7 m,高度加高至 0.7 m,形成刚域,提升节点刚度。桥面竖曲线为圆曲线,半径 $R=201.95\text{ m}$,拱形矢高为 0.7 m,矢跨比为 1/48;刚性索为平面圆曲线, $R=84.84\text{ m}$,悬索垂度为 1.68 m,垂跨比为 1/20;梁端斜塔垂直高度为 2.1 m,外倾角度为 20.128° ,塔梁固结。墩梁固结,桥墩为钢管墩内填混凝土,单墩下设置 1.2 m 钻

孔灌注桩基础。图 2 所示为桥梁总体立面图;图 3 所示为桥梁总体平面图;图 4 所示为桥梁关键横断面图。

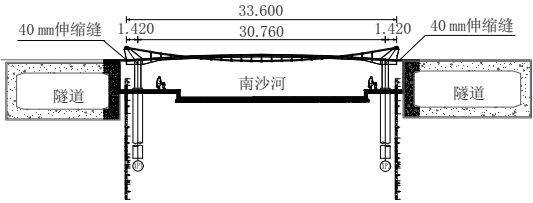


图 2 桥梁总体立面图(单位:m)

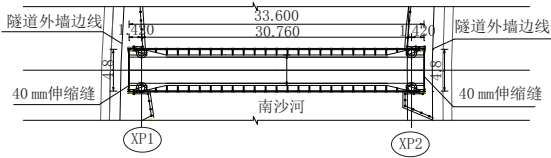


图 3 桥梁总体平面图(单位:m)

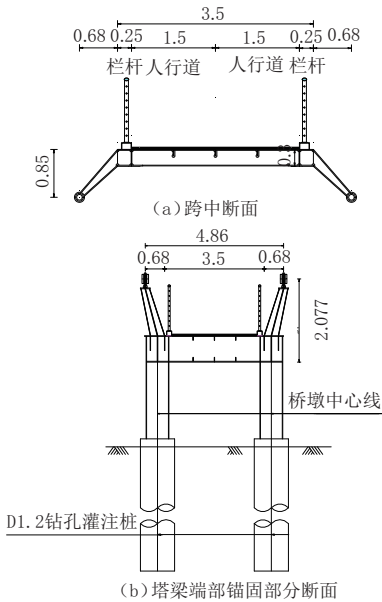


图 4 桥梁关键断面图(单位:m)

3 结构体系传力机制和实现办法

3.1 传统张弦梁结构梁传力机制

传统张弦梁结构体系是一种由刚性构件上弦杆、高强柔性拉索系统,中间通过刚性撑杆连接的体系,可以通过高强度柔性拉索的张拉来调整结构体系内部杆件之间的受力;在外部是一个空间自平衡结构体系,造型变换多样,在大跨空间结构中应用广泛。

但是张弦梁结构属于柔性结构,由于拉索构件在无应力和有应力状态下的刚度差异较大,因此这种结构体系都具有明显的非线性属性,从而增加了这类工程设计和建设的复杂性。同时,作为主要承重构件的拉索设计使用年限为 30 年,而主体结构设计使用年限一般都为 50 年或 100 年,在整个桥梁生

命周期内,拉索都需要更换,也限制了这类结构的使用范围。

3.2 项目中类张弦梁创新之处

该项目对传统张弦梁进行了2个较大的调整和优化。一是将传统张弦梁中的柔性拉索替换成刚性索,采用钢结构圆管,通过控制钢结构圆管的直径与壁厚比来保持构件的刚度,这样便简化了传统结构体系中因存在柔性构件而导致的非线性复杂问题,结构体系只有一个状态,大为简化了设计和建设;同时也为后期养护提供了便利。二是调整了传统张弦梁中柔性拉索与主梁的相对位置,将刚性索竖向位置向上抬,在跨中位置位于主梁下面,在支点位置位于主梁上面,从而大大减少了结构在跨中位置的建筑高度,让结构显得更加轻薄;同时在梁端位置设置了一个倾斜的桥塔,将主梁和刚性索连接在一起,在主梁上部又形成了一个有特色的上部建筑结构。

桥梁结构体系如图5所示。在恒载作用下,刚性索受拉,主梁在跨中位于刚性索上面的区域受拉,主梁在两端位于刚性索下面的区域受压;主梁下方的斜杆受压,主梁上方的斜杆受拉。

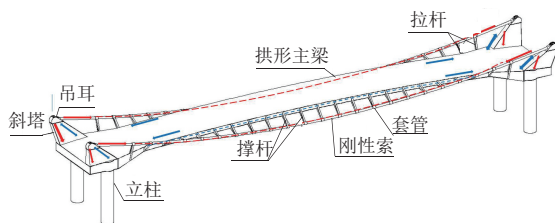


图5 桥梁结构体系示意图

3.3 关键节点实现办法

在该工程中,拱形主梁采用2道纵梁+多道横梁体系。跨中范围的主梁通过在梁体外侧的工字钢斜撑支撑在刚性索上,梁端范围的主梁通过梁体外侧的工字钢斜撑悬挂在刚性索下;刚性索与钢塔铰接,钢塔、主梁梁端大横梁和钢管墩之间固结,形成类张弦梁体系。

刚性索的圆管内部通过螺纹与U型一体化叉耳形成连接节点,桥塔顶部设置耳板,在这个节点部位,叉耳通过销轴连接,可以自由转动以释放转动约束。一体化叉耳和塔顶耳板节点如图6所示。

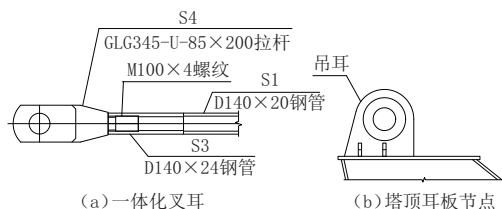


图6 一体化叉耳和塔顶耳板示意图

4 结构设计

4.1 主梁

主梁采用2道纵梁+横梁的梁格结构,材料采用Q345qE。单侧纵梁标准段为工字形焊接截面,高度为300 mm,翼缘宽度为450 mm,顶板板厚为12 mm,底板板厚为20 mm,腹板板厚为12 mm。2道主梁间距为3 m,主梁之间布置工字形横梁连接,在跨中范围,横梁标准段间距1.25 m。靠近支点范围,主梁调整为封闭箱型断面,以增加节点的整体刚度,与桥塔和立柱构成刚性节点,并灌注C40微膨胀混凝土。主梁在纵横梁形成的梁格体系上,铺设厚12 mm的桥面板^[5]。

4.2 刚性索

刚性索布置在主梁外侧0.68 m处,刚性索布置在一个平面内,在面内为圆弧线。材料采用Q345qE,选用结构用无缝钢管,直径为140 mm,壁厚为20~24 mm。刚性索两端铰接在外倾的桥塔上,铰接轴采用钢拉杆U型叉耳。

4.3 斜杆

斜撑杆采用变高度工字形断面。腹板高度为100~300 mm,腹板板厚16 mm,上、下翼缘宽度为100 mm,板厚16 mm。横撑在主梁横梁对应位置设置,间距为1.25 m,分别与纵梁焊接,与刚性索采用套管连接后焊接。

4.4 外倾梯形桥塔

主塔为向横断面外侧倾斜钢塔,倾斜角度为20.128°夹角。截面为矩形,塔高2.1 m,桥塔截面从塔顶到塔底由800 mm×300 mm线性过渡到2 000 mm×500 mm,塔与下部结构立柱采用刚接节点,确保了钢塔与混凝土立柱和钢结构主梁内力的有效传递。在塔内设置钢混结合段,钢塔壁板内侧设置PBL剪力键,即开孔钢板连接件,这是一种用于钢混组合结构中传递混凝土与钢板间剪力的机械式连接件。本桥PBL剪力键中钢板采用宽度为100 mm、厚度为10 mm的Q345qE,钢板上开孔直径为50 mm,开孔间距100 mm,并灌注C40微膨胀混凝土。这有助于提升混凝土抗裂性能和钢材与混凝土两种材料复合作用的长效性,形成刚域。

4.5 下部结构

桥墩立柱直径为0.8 m,采用Q345qE,钢管壁厚20 mm。立柱伸入直径为1.2 m的钻孔灌注桩基础,设置钢混结合段,并在钢管立柱内灌注C40

微膨胀混凝土。

4.6 桥面铺装

桥面铺装总高度为 40 mm,采用厚 30 mm 火烧花岗
岩防滑地砖,钢梁表面焊接钢筋网片并浇筑厚
10 mm 环氧砂浆。人行道铺装面层防滑指标 BPN≥
80,保证了铺面的抗滑性能。

4.7 玻璃栏杆

景观上为了尽量降低主梁的视觉高度,采用了
304 不锈钢栏杆立柱+双层夹胶钢化玻璃形式。栏杆
立柱间距为 3 m,中间布置 2 块宽 1.5 m 玻璃栏板。

5 桥梁结构受力分析

5.1 结构有限元模型

采用大型商业有限元软件 MIDAS Civil 建立空间
有限元模型,刚性索、纵梁、横梁和立柱、桩基采用空
间梁单元进行模拟,桥面板采用空间板单元模拟,主
塔采用实体单元模拟;主梁与桥塔刚接,刚性索与桥
塔铰接。在刚性索与桥塔连接位置,采用释放刚性
索靠近塔顶端部绕单元局部坐标系 y 轴和 z 轴方向
的弯曲刚度,即竖向弯曲刚度和横桥向弯曲刚度,来
模拟单元坐标系内纯铰接连接形式;桩土相互作用
采用节点弹性支撑进行模拟,进行全桥静力和动力
分析计算。桥梁有限元模型如图 7 所示。

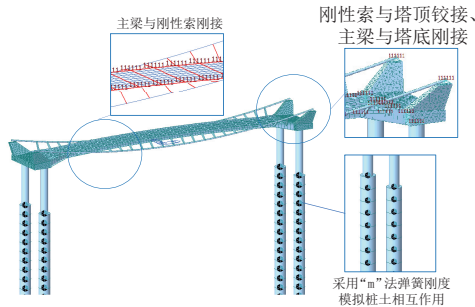


图 7 桥梁有限元模型

5.2 计算工况

正常使用状态和承载能力极限状态下,设计荷
载考虑结构自重、二期铺装及附属结构自重荷载、
人群荷载、风荷载、整体升降温度荷载和基础变位。
荷载组合系数根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG
D60—2015)确定,用以验算结构的强度、刚度、稳定
性、舒适度等。

偶然荷载地震作用下,考虑结构自重、二期铺装
及附属结构自重荷载与水平 x 方向、 y 方向地震作用
分别叠加组合,抗震设防基本烈度为 8 度,设计动峰
值加速度为 $0.20g$,场地类别为 III 类;桥梁抗震设防
为丁类,此时仅需计算 E1 级别地震作用下,结构承

载能力极限状态下的强度。

5.3 主要验算项目

5.3.1 强度计算

表 1 给出了主要受力构件的应力计算结果。由
表 1 可见:在标准组合下,纵梁最大拉应力为 67.2 MPa,
最大压应力为 -126.0 MPa;刚性索最大拉应力为
101.6 MPa;横梁的最大拉应力为 33.2 MPa,最大压应
力为 -51.2 MPa;桥面板最大拉应力为 53.7 MPa。图 8
为桥塔实体单元应力情况。由图 8 可见,在标准组
合下,桥塔实体单元最大拉应力为 25.3 MPa,最小拉
应力为 0.2 MPa,说明桥塔位置局部存在较大拉应
力,因此采用钢混组合结构是比较合适的。利用钢
材抗拉,利用混凝土提供节点刚域,上述应力的计
算结果表明,本桥主要构件的应力水平平均小于设计容
许值,结构强度满足要求^[5-8]。

表 1 主要受力构件应力计算结果

构件	工况	位置	应力最大值/MPa	应力最小值/MPa
纵梁	恒载	顶缘	35.1	-28.7
	恒载	底缘	15.3	-66.7
	活载	顶缘	26.6	-22.7
	活载	底缘	11.9	-50.7
	标准组合	顶缘	67.2	-53.9
	标准组合	底缘	31.5	-126.0
横梁	恒载	顶缘	8.1	-7.8
	恒载	底缘	16.7	-26.3
	活载	顶缘	8.1	-8.8
	活载	底缘	13.5	-19.5
	标准组合	顶缘	17.6	-17.7
	标准组合	底缘	33.2	-51.2
刚性索	恒载	顶缘	49.3	25.9
	恒载	底缘	55.2	23.3
	活载	顶缘	39.4	19.2
	活载	底缘	42.6	15.3
	标准组合	顶缘	91.1	43.1
	标准组合	底缘	101.6	36.1
桥面板	恒载	顶缘	27.4	0.6
	恒载	底缘	34.5	0.5
	活载	顶缘	22.4	0.8
	活载	底缘	26.2	0.8
	标准组合	顶缘	53.7	3.0
	标准组合	底缘	38.7	3.1

5.3.2 变形计算

在人群荷载作用下,主梁最大竖向挠度是反映
结构的刚度直观指标。本桥跨中竖向挠度为向下
33 mm,小于《城市人行天桥与人行地道技术规范》
(CJJ 69—1995)中对主梁变形的要求($L/600=30\ 760/$

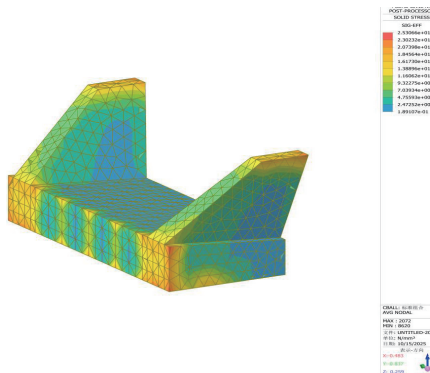


图8 桥塔在恒载下的有效应力图(单位:MPa)

600=51.26 mm)。因此,本桥变形满足要求。

5.3.3 动力特性和人致振动舒适性分析

钢结构人行桥由于自重轻,激发其振动所需要的总能量较低,当人行桥自振频率与行人步行频率接近时,易引发共振,导致振动幅度放大,给行人带来不安全感,因此我国人行桥设计规范中要求人行天桥上部结构竖向自振频率不小于3 Hz。但我国人行桥设计规范发布时间较早,对人致振动方面的控制指标较为单一且限值偏高,现代设计的轻柔型人行桥一般很难满足这个竖向基频3 Hz要求^[9-15]。为此,本桥采用国际化性能指标,用振动加速度来反映桥梁的舒适度,即采用《德国人行桥设计指南》(EN03 2008)^[11]作为我国《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ 69—1995)中对人行桥舒适性验算的补充。文献[11]中对桥梁自振频率的敏感范围如表2所示。其中对1阶竖向、纵向、横向;2阶竖向、纵向、横向的振动敏感频率均有较为细致的划分。

表2 文献[11]中规定的桥梁自振频率敏感范围

振动形式	频率/Hz
1阶竖向和纵向振动	1.25 ~ 2.3
1阶横向振动	0.5 ~ 1.2
2阶竖向和纵向振动	2.5 ~ 4.6

通过动力特性分析,可以快速反映结构的动力性能。本桥的前5阶自振频率如表3所示;主要振型如图9所示。由表3可见,本桥的1阶竖向自振频率为2.79 Hz,1阶纵桥向振动频率为2.0 Hz,处于文献[11]规定的步频敏感范围(1阶竖向和纵向振动频率为1.25 ~ 2.3 Hz);1阶横向振动频率为3.0 Hz,不处于文献[11]规定的步频敏感范围(1阶横向振动频率为0.5 ~ 1.2 Hz)。因此需对本桥的竖向人致振动加速度响应作进一步分析。

为了安全起见,进一步依据文献[11]对本桥进行人致振动舒适性分析。采用线性时程分析方法,

表3 本桥自振频率和振型描述

模态	频率/Hz	振型描述
1	2.0	纵桥向桥墩+主梁1阶振动
2	2.7	竖向主梁1阶振动
3	3.0	横桥向桥墩+主梁1阶振动(正对称)
4	3.7	横桥向桥墩+主梁1阶振动(反对称)
5	3.8	主梁扭转

取结构的阻尼比为0.003,以人致振动时程作为激励,经过分析后,竖向最大振动加速度为0.375 m/s²,如图10所示,小于文献[11]中CL1舒适度等级对应的最大竖向加速度限值($a_{lim-v}=0.5\text{ m/s}^2$)。因此经过人致振动舒适度计算,表明本桥满足人行舒适性要求。



图9 前5阶振型

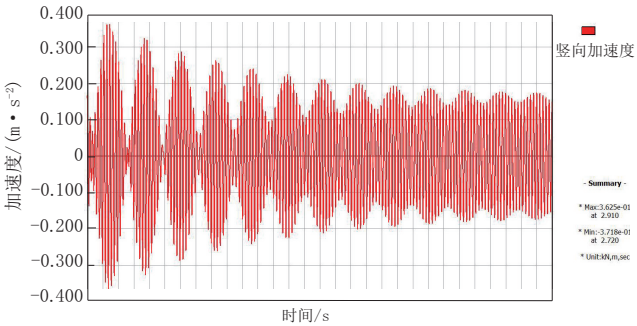


图10 主梁竖向振动加速度图

6 结 语

(1)迎泽公园人行桥的顺利建成,证明这种创新桥型的构想是可以实现的。该桥型让桥梁结构看起
(下转第219页)