

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.08.019

# 一种混合结构拱脚的设计与计算分析

徐营营

(东南大学建筑设计研究院, 江苏 南京 210018)

**摘要:** 钢混结构因其能充分发挥钢、混各自材料的性能优势,近年来被广泛应用于桥梁结构中。以七都二桥为工程背景,概述了混合结构拱脚的设计要点,介绍了七都二桥拱脚结合部的构造特点,采用有限元软件 ANSYS 建立了拱脚节段,分析了结合部各构件的受力情况。研究表明:拱脚钢混过渡区域由于刚度突变呈现较明显的应力集中现象;横梁作为结合部主要传力构件,表现为明显的边缘局部受力状态;提出的拱脚钢混结合部构造能够较好地传递拱脚内力。

**关键词:** 混合结构拱脚;连接形式;有限元分析

**中图分类号:** U443

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2024)08-0078-04

## 0 引言

钢混结构因其能充分发挥钢、混各自材料的性能优势,近年来被广泛应用于桥梁结构中。除将钢构件、混凝土构件应用于桥梁同一构件外,目前应用较多的是钢、混凝土结构各自作为构件存在,两者通过一定的连接件结合成一体,承担并传递荷载,这种构造称为“混合结构”<sup>[1]</sup>。拱桥因其跨越能力较大、丰富的造型变化被广泛应用于市政景观桥梁设计中。钢拱肋是大跨径拱桥的首选结构形式,通常设计混凝土基座将上部结构恒载、运营期活载及温度作用等传递到下部基础。本文以一座新建七跨连续梁拱组合桥为工程背景,研究一种钢箱拱肋与混凝土基座结合的混合拱脚结构,介绍了其拱脚结合部的构造,采用有限元分析软件 ANSYS 建立了该桥主拱脚段的空间有限元模型,进行局部受力计算分析,验证了本桥拱脚钢混结合部结构设计的可靠性。

## 1 工程概况

七都二桥主桥结构采用七跨连续钢箱拱桥方案,其中中间三跨为中承式拱桥,两侧各两跨均为上承式和半波上承式拱桥结构,桥跨径布置为:70 m+100 m+140 m+200 m+140 m+100 m+70 m=820 m,其立面布置见图 1。钢拱肋拱轴线型采用空间样条曲线,断面形式为六边形+圆弧顶面装饰。主桥主

梁采用双层桥面结构形式,上层桥面为机动车桥,采用双边箱钢箱梁结构形式,下层桥面为非机动车及人行桥,采用钢桁架结构形式。主桥中间三跨中承式拱区域桥面总宽度 36 m(含风嘴)。

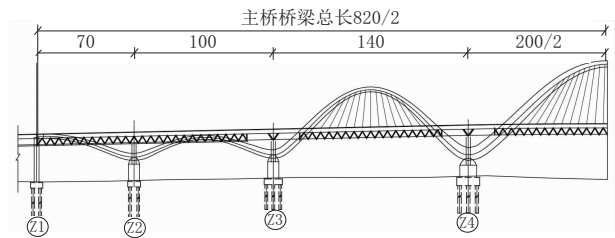


图 1 桥梁立面图(单位:m)

## 2 混合结构拱脚设计要点

### 2.1 结合部连接形式

钢混拱脚结合部的设计应保证刚度过渡均匀、平顺,能够有效传递弯矩、轴力及剪力,应设置可靠的连接件来保证钢与混凝土的有效结合。桥梁主拱脚处内力列于表 1,以弯矩最大工况读取内力,考虑恒载、活载、风载、温度及沉降作用。桥位处台风为该区主要气象灾害,按 W1 风作用水平和 W2 风作用水平进行结构抗风计算。组合一对应顺桥向弯矩最大工况、组合二对应横桥向弯矩最大工况。从表 1 可以看出拱脚主要承受弯矩,其次为轴力,剪力相对较小。以往典型的拱脚结合部设计,拱座受力多为小偏心受压,结合部连接多采用完全承压式或承压传剪式,并施加预应力来平衡截面弯矩,使结合部混凝土处于全截面受压状态<sup>[2,3]</sup>。例如菱湖大桥混合拱脚采用完全承压式并于拱肋外施加预应力,依靠端部较厚的承压板及其加劲传递压力,依靠预应力筋承担弯矩中的拉力;

收稿日期: 2023-07-25

作者简介: 徐营营(1991—),女,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

泗河大桥采用承压传剪式并于拱肋内布置少量预应力筋,将拱肋埋入拱座一定深度并设置前承压板,该构造主要依靠埋入拱座段钢板、承压板及连接件传力。本桥拱座外形采用弧形锥面设计,结合部拱座截面尺寸较下部桥墩小,截面为大偏心受压,为保证弯矩的可靠传递、结合部的全截面受压,结合部采用钢套筒承压传剪式与预应力筋锚杆式相结合的设计方式,即在拱脚处设置箱形钢横梁并埋入拱座一定深

度,在四周设置竖向预应力筋。结合部灌注混凝土至拱壁顶板,并在横梁与混凝土结合处设置栓钉及PBL开孔板,在拱壁与混凝土结合处设置栓钉。该构造具有结合部刚度大、传力性能优、钢混连接可靠的优点。结合部弯矩主要是通过钢横梁和预应力筋受拉、钢横梁及混凝土受压来平衡,剪力通过焊于拱壁及横梁的栓钉传递给混凝土,轴力则主要通过设于横梁的开孔板及栓钉传递给混凝土。

表 1 拱脚内力

组合	$f_x$ /kN	$f_y$ /kN	$f_z$ /kN	$M_x$ /(kN·m)	$M_y$ /(kN·m)	$M_z$ /(kN·m)
组合一:W1风作用水平:1.2恒载+1.05温度效应+1.4汽车+1.05人群-1.1W1+0.5沉降	-38 210	13 198	5 234	-30 926	222 453	-14 081
组合二:W2风作用水平:1.2恒载+1.05温度效应+1.4W2+0.5沉降	-29 222	3 040	-918	-56 333	126 827	107 899

注: $x$ 为单元轴向, $y$ 为顺桥向, $z$ 为横桥向。

### 2.2 结合部构造

拱脚钢构件主要由拱壁、纵向加劲肋、横隔板、埋入拱座段箱形钢横梁组成,采用Q390D钢材,主要构件构造见图2。拱壁板厚30mm,拱壁加劲采用板肋,尺寸为24mm×280mm;普通隔板板厚16mm,采用实腹式隔板;箱形钢横梁顺桥向为8m,横桥向约4.4m,顺桥向钢板厚度40mm,横桥向钢板厚度30mm,钢箱埋深自预应力筋锚固点起算为6m。埋入拱座段箱形横梁双面设置穿筋开孔板及D22×150圆柱形ML15焊钉,竖向间距250mm,间隔设置。其中开孔板尺寸为22mm×260mm,间距450mm。考虑穿筋及粗骨料最小直径,开孔板孔径取80mm,穿入筋采用直径25mm钢筋。布置于箱形钢横梁四周的竖向预应力筋采用PSB930级高强钢棒,直径65mm,共计46根,锚下张拉控制力取750MPa。箱外预应力筋与钢横梁间设置预应力锚箱与钢横梁焊接。此外,为保证结合部混凝土全截面受压,箱内布置20束15- $\phi$ 15.2钢绞线,延伸至拱肋顶部,锚下张拉控制力取1200MPa。结合部混凝土采用C50微膨胀混凝土,为保证混凝土浇筑质量,在拱圈底板设置振捣孔,在板件封闭死角设置30mm孔径通气孔。施工流程为:吊装完拱脚节段后,先浇筑箱外混凝土至箱外预应力筋张拉面,浇筑箱内混凝土至拱壁底板;张拉箱外预应力筋;浇筑箱内混凝土并张拉预应力钢绞线;最后浇筑外包弧形混凝土。

### 3 计算及结果分析

拱脚节段局部模型采用有限元分析软件ANSYS建立,节段共长16.8m。拱座混凝土采用实体单元模

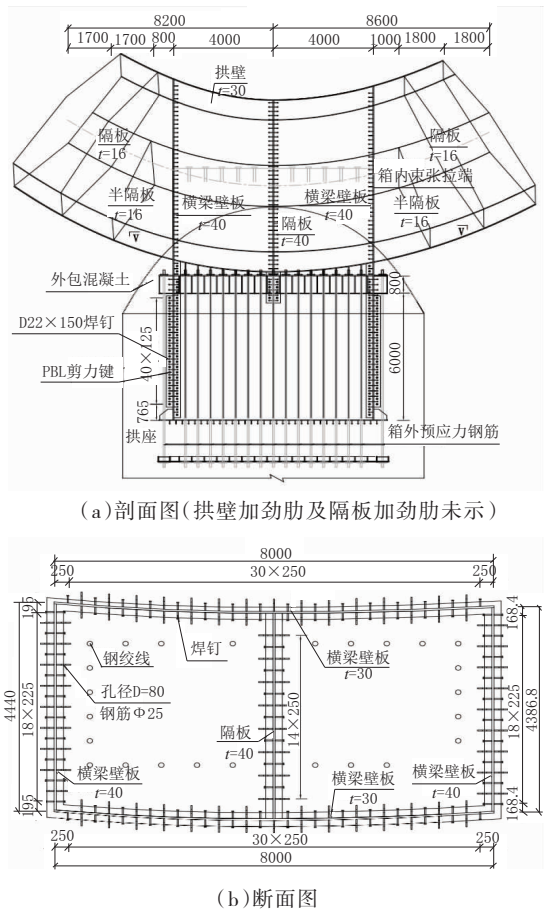


图 2 拱脚结合部主要构件示意(单位:mm)

拟,钢板采用实体单元+壳单元模拟,预应力根据实际位置以外力施加,混凝土拱座与钢横梁、拱壁之间通过接触单元来连接。分析钢构件应力时混凝土定义为线弹性材料。分别以W1风作用水平对应顺桥向最大弯矩、以W2风作用水平对应横桥向最大弯矩来进行拱脚受力分析。荷载取MIDAS模型各关键位置处内力以荷载形式施加在模型上,桥墩底部固

结。不考虑钢套筒外螺纹钢筋锚固面以上混凝土参与受力。

### 3.1 拱脚钢构件受力

本桥采用提篮拱,主拱设置内倾角,角度为 $17.1^\circ$ 。拱肋设置内倾角可大大提高拱桥的侧向刚度,增加拱桥的面外稳定性,且可以有效提高全桥的面内刚度。主拱脚呈内倾状,受力上内侧腹板更不利。拱脚内侧板件mise应力云图见图3、图4。从图3、图4看出,工况二应力水平要高于工况一。工况一最大应力值为 $107.8\text{ MPa}$ ,应力主要集中于大跨一侧上腹板;工况二最大应力值为 $211.8\text{ MPa}$ ,应力主要集中于大跨一侧下腹板。钢混结合区域钢板应力较小。对于埋入拱座的钢横梁,由于横桥向拱座尺寸大,横桥向钢板受力整体低于顺桥向;顺桥向钢横梁与拱圈腹板板件交汇处存在应力集中,工况一最大应力值为 $56.4\text{ MPa}$ ,工况二最大应力值为 $122.7\text{ MPa}$ 。将两种工况下最不利钢横梁的应力分布云图示于图5、图6。钢横梁作为最主要的传力构件,表现为明显的边缘局部受力状态<sup>[5]</sup>,横梁与拱肋接触区域应力明显高于其他区域,结合拱圈内填充混凝土的受力状态(同样表现为明显的边缘受力特征,文中未示意),说明拱圈通过与之接触的横梁将力传递给拱内混凝土。

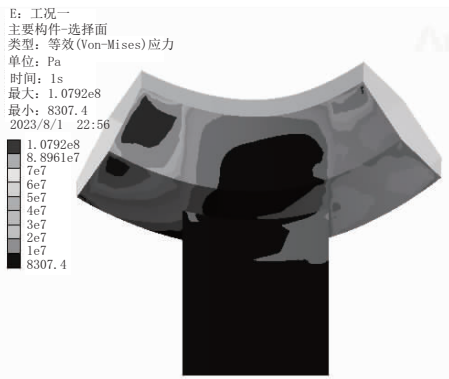


图3 工况一内侧板件mise应力云图(单位:Pa)

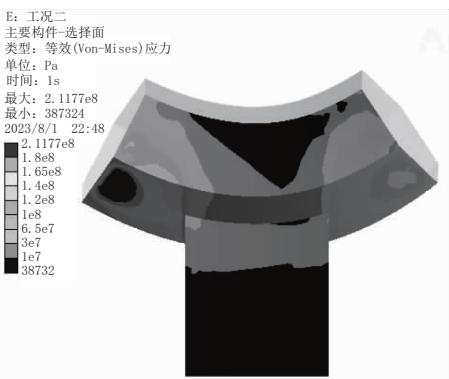


图4 工况二内侧板件mise应力云图(单位:Pa)

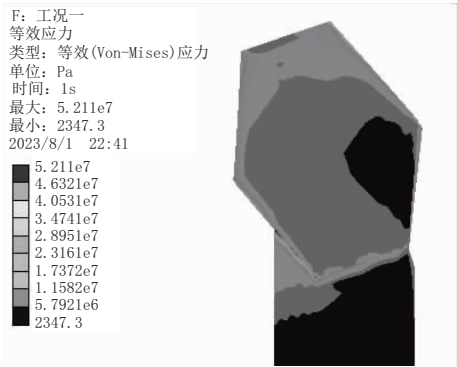


图5 工况一钢横梁mise应力云图(单位:Pa)

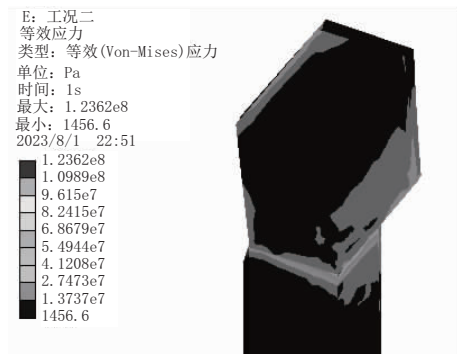


图6 工况二钢横梁mise应力云图(单位:Pa)

### 3.2 混凝土拱座受力

拱座的受力验算应考虑预应力高强钢筋以及预应力钢绞线的作用。拱座混凝土主拉应力见图7、图8。在预应力的作用下,拱座整体受压,与钢结构接触面局部应力要明显高于中间区域。工况一作用下,局部拉应力最大为 $5.1\text{ MPa}$ ,位置与钢横梁应力集中处一致。工况二作用下,局部拉应力最大为 $3.8\text{ MPa}$ ,位置与钢横梁应力集中处一致。实际设计中,该位置处于外包混凝土薄弱面,应通过加强该处配筋、减弱钢结构与外包混凝土的连接等措施使得该处混凝土承载力和裂缝得到有效控制。

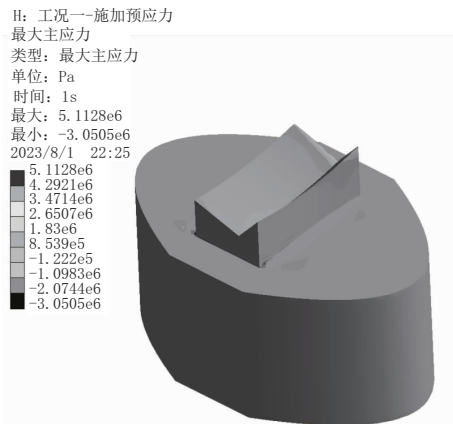


图7 工况一拱座混凝土主拉应力(单位:Pa)

## 4 结语

本文介绍了一种混合拱脚的构造形式,通过建

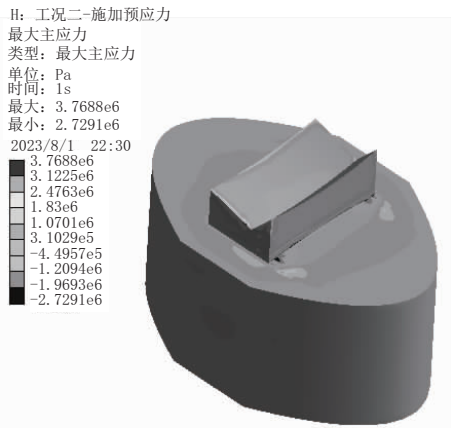


图 8 工况二拱座混凝土主拉应力(单位:Pa)

立有限元模型,分析了结合部各构件的受力情况。

(1)结合部的构造设计需综合考虑拱脚受力情况。

(2)拱脚钢混过渡区域由于刚度突变呈现较明显的应力集中。

(3)拱圈通过与之接触的横梁将力传递给拱内混凝土,横梁作为主要传力构件,表现为明显的边缘局部受力状态。

(4)本文提出的拱脚钢混结合部构造能够较好地传递拱脚内力。

参考文献:

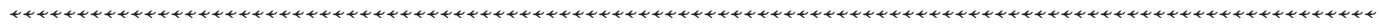
[1] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].

[2] 聂建国.钢-混凝土组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2011.

[3] 王茜,王春生,俞欣,等.钢桥塔的构造设计研究[J].公路,2008(5): 46-50.

[4] 李乔,武焕陵,唐亮,等.南京长江三桥桥塔钢混结合段内力分布规律研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2005 年全国桥梁学术会议文集.北京:中国公路学会,2005.

[5] 邓勇灵.梁-拱组合桥拱脚钢混结合区域力学行为研究[D].成都:西南交通大学,2016.



(上接第 68 页)

需求、结构特点、文化背景、设计目标及理念等因素,对人行天桥进行景观方案设计。珠海大道快速化提升工程桥梁方案注重细节设计、亮点突出,可供类似工程参考。

参考文献:

[1] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

[2] JTG/T 3360-03—2018,公路桥梁景观设计规范[S].

[3] CJJ 69—1995,城市人行天桥与人行地道技术规范[S].