

悬索桥拱形钢桥塔主索鞍的传力机理研究

戴伟¹, 王明晔²

[1. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200433; 2. 上海市政交通设计研究院有限公司, 上海市 200030]

摘要: 太原市通达桥是主跨208 m的单塔自锚式悬索桥, 桥塔采用了新颖的中上部钢结构、底部钢混组合结构的复合结构桥塔形式, 既能充分发挥塔底钢混组合结构的承载能力, 又能极大降低桥塔自重, 解决了桥梁抗震带来的一系列问题。但此桥塔造型需要桥梁采用空间缆索, 桥塔外壁也多为空间曲面板件, 钢塔构造较为复杂。为使桥梁主索鞍传递至桥塔的巨大集中荷载能均匀传递至塔柱, 保证桥梁的使用安全性, 对该桥塔的横梁结构、主索鞍下的钢塔构造、受力状态和传力机理进行了研究, 所得结果可为今后此类型钢桥塔的设计提供一些参考。

关键词: 混合结构桥塔; 桁架式横梁; 鞍座支撑加劲肋; 传力机理

中图分类号: U443.38; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0055-06

Research on Force Transmission Mechanism of Main Cable Saddle for Arch-shaped Steel Pylon of Suspension Bridge

DAI Wei¹, WANG Mingye²

[1. Tongji Architectural Design (Group) Co., Ltd, Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Municipal Transportation Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200030, China]

Abstract: The Tongda Bridge in Taiyuan City is a single-pylon self-anchored suspension bridge with a main span of 208 m. The bridge pylon is a novel composite structural pylon form with a middle upper steel structure and a bottom steel-concrete composite structure, which not only fully utilizes the bearing capacity of the steel-concrete composite structure at the bottom of the pylon, but also greatly reduces the self weight of the bridge pylon, solving a series of problems caused by seismic resistance of the bridge. However, the design of this bridge pylon requires the use of spatial cables for the bridge, and the outer walls of the bridge pylon are mostly spatial curved surface plates. The structure of the steel pylon is rather complex. In order to make that the huge concentrated load transmitted from the main cable saddle of the bridge to the bridge pylon can be evenly transferred to the pylon column, and ensure the service safety of bridge, the beam structure of the bridge pylon, the structure of the steel pylon under the main cable saddle, the force state and the force transmission mechanism are studied. The obtained results can provide some references for the design of such steel bridge pylons in the future.

Keywords: composite structural bridge pylon; truss crossbeam; saddle support stiffeners; force transfer mechanism

0 引言

主索鞍是悬索桥主缆系统的重要受力构件, 其主要作用是支承主缆并将全桥荷载传递到主塔上。由于悬索桥桥塔的受力特点, 目前国内已建成的悬索桥主要采用混凝土桥塔, 因此国内文献对悬索桥钢桥塔的受力研究相对较少。以背景工程为例, 通过本文的研究, 对主索鞍下钢塔的结构形式进行优化布置, 使得主索鞍传递至桥塔的巨大集中荷载能

均匀传递至塔柱, 保证了桥梁的使用安全性^[1-2]。

1 工程概况

该工程是独塔自锚式悬索桥, 主跨208 m, 桥塔为钢结构-组合结构复合拱形塔, 外轮廓为空间曲面形态, 总高度123.471 m, 在高度方向桥塔横截面不断变化(见图1)。桥塔由4部分构成, 自上而下依次是: 塔冠钢装饰段12.7 m、桥塔钢横梁段18.05 m、主塔钢塔身段65.87 m、主塔钢混组合段26.851 m。该结构形式上部的钢结构桥塔解决了拱形桥塔顶部横梁的受力问题, 并显著降低了桥塔自重, 减小了地震荷载下产生的塔底弯矩; 塔底钢混组合结构则充分

收稿日期: 2025-08-01

作者简介: 戴伟(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计工作。

发挥其承载能力,解决了桥梁抗震带来的一系列问题^[3-4]。

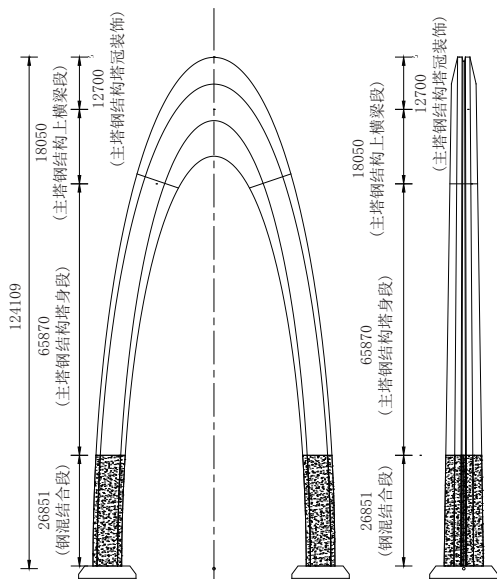


图1 复合结构桥塔分段示意图(单位:mm)

钢混组合段塔身截面为单箱单室钢混组合结构,顺桥向和横桥向壁厚均为1.75 m。外塔壁钢板厚度40~28 mm,内塔壁钢板厚度32~16 mm,并采用桁架杆件将内外塔壁连为一体,内外壁板间填充混凝土。

钢塔柱段为单箱3室钢结构(见图2),外壁板厚48~28 mm,中腹板板厚48~28 mm,实腹式隔板间距3 m,空腹式圈板间距3 m,间隔布置。

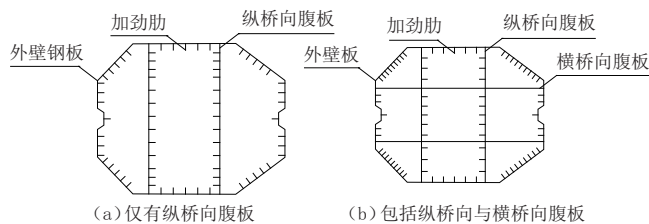


图2 钢塔柱截面形式

由该桥塔构造可知,其外壁板多为空间曲面,构造极其复杂,且塔顶横梁构造也较为复杂,索鞍为非水平放置,因此索鞍传力机理不明确,需要做进一步理论分析,为今后此类桥塔的设计计算奠定一定的基础^[5]。

2 传力构件的结构形式

2.1 索鞍构造设计

为保证施工质量和工期,索鞍最终采用全铸式纵横肋间接传力式结构。

索鞍纵桥向截面构造图和三维示意图见图3、图4。

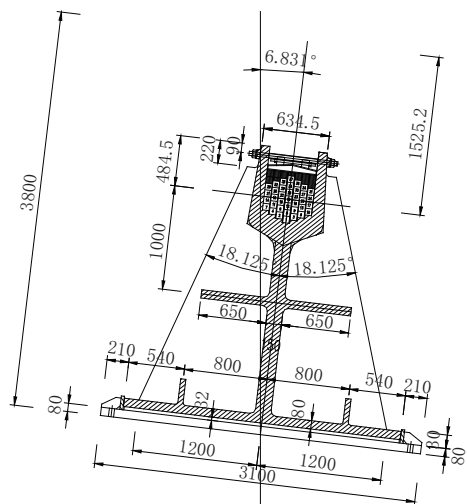


图3 索鞍纵桥向截面构造图(单位:mm)

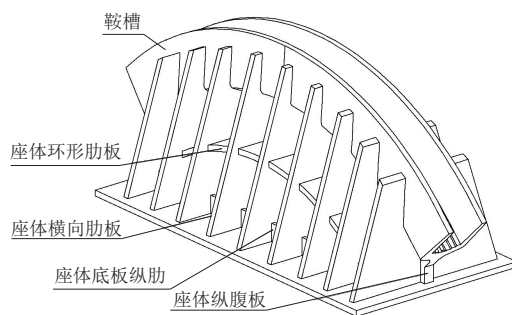


图4 索鞍构造三维示意图

由于拱形桥塔的形态特点,采用了空间主缆形式,因此该索鞍中心线与竖直方向存在 6.831° 的夹角^[6-7]。

2.2 索塔横梁设计

2.2.1 横梁构造设计难点

该项目钢桥塔是拱形桥塔,顶部的横梁将内倾的塔柱连接为整体框架,以确保结构稳定并提供主索鞍的安放空间,将主缆力传递给塔柱直至基底^[8]。

横梁构造的主要设计难点如下:

(1)由于整体受力及造型限制,主索鞍位置以下的横梁高度过小,若仅靠下方横梁,将无法满足不同强度和刚度需求。

(2)主塔截面越往高处其侧壁板的翘曲程度越大,在上横梁位置时已完全成为翘曲板而无法满足不同受力需求。也就是说上横梁外壁板中位置1和2(见图5)不能作为上横梁承力构件使用。

(3)索鞍处局部受力巨大,空间却相当狭小,局部加劲及隔板布置难度大。

2.2.2 横梁构造设计

以SY1+SY2形成的高3.62 m箱室和SY3+SY4形成的高2.5 m箱室共同组成“桁架上下弦杆”,而SY2与SY3之间部分相当于“桁架腹杆”,最终确定上横

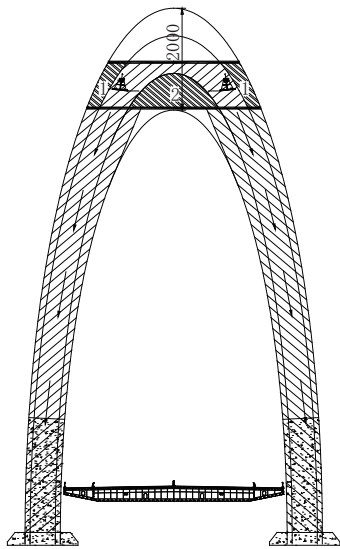


图5 主塔横梁范围及主塔传力途径(单位:mm)

梁高度为11.3 m。整个上横梁受力翼缘的布置基于构造需求和桁架受力理念而确定(见图6)。翼缘板的加劲布置按照受压构件不折减的原则,同时对于交叉板件进行相应的局部调整^[9]。

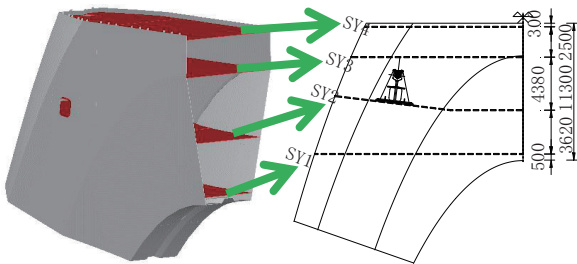


图6 主塔横梁构造示意图(单位:mm)

考虑到上横梁外壁板侧壁翘曲板不作为受力构件,在上横梁内增设2道内腹板,间距2.49 m。此时,腹板HNFB在上横梁翼缘SY4处与壁板间距为1.85 m,在翼缘板SY1处与壁板间距为1.99 m。为保证与塔身横向内腹板衔接,在横梁节段范围内线性过渡(见图7)。

2.2.3 鞍座下方纵向隔板及加劲设计

如图8所示,鞍座下方设置3道实腹隔板,其中1道与鞍座中心板件对齐,左右间距1 m再设置2道。鞍座下方局部支撑加劲布置必须结合鞍体构造来布置,两两对应,以实现传力的直接性。

鞍座支撑加劲构造见图9。由于鞍座下方纵向设置了3道实腹横隔,相邻横隔板最小间距仅有775 mm,考虑施工空间后,对支承加劲作了开孔处理^[10]。

3 受力分析

3.1 有限元模型的搭建

为分析索鞍空间传力机理,需将索鞍与桥塔其

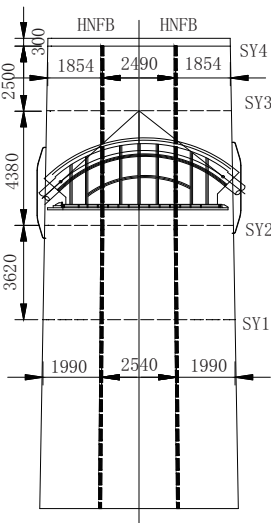


图7 上横梁侧立面(单位:mm)

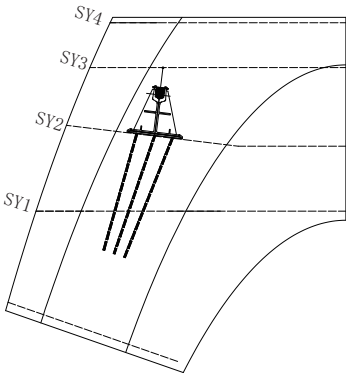


图8 鞍座下方纵向隔板设置

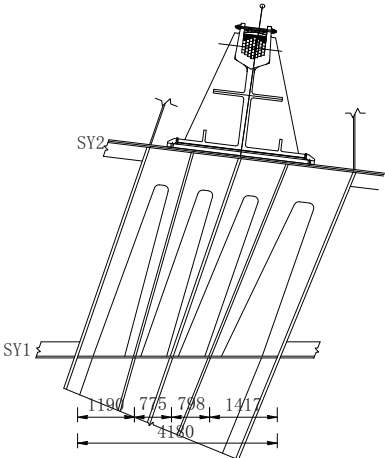


图9 鞍座支撑加劲构造图(单位:mm)

他结构一起建立整体有限元模型进行分析。因此根据结构实际尺寸建立实体板壳模型进行分析。以板壳单元模拟钢结构、实体单元模拟混凝土,考虑桥塔底座并去除塔顶装饰结构,建立混合拱塔有限元模型^[11]。

上部塔柱考虑外壁板、纵横桥向腹板、实心横隔板,未考虑空心横隔板,塔壁上加劲肋以面积等效的方式等效到相应壁板上^[12](见图10)。

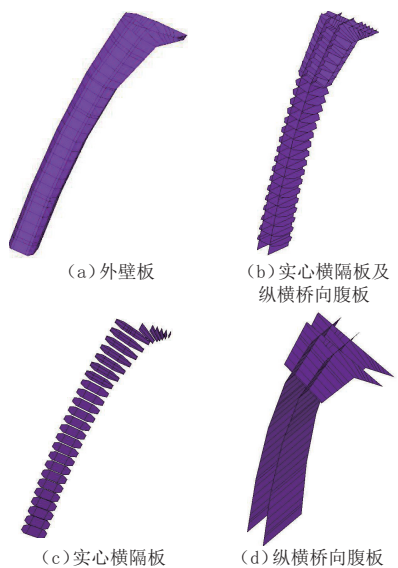


图 10 上部塔柱板件有限元模型

横梁考虑外壁板、纵横桥向腹板、水平横隔板、竖向实心隔板、索鞍支承加劲、索鞍,未考虑竖向空心隔板。由于鞍座底板厚 210 mm (130 mm+80 mm), 下面的支承垫板厚 60 mm, 因此在建模时考虑将 3 块板按照叠合板抗弯惯性矩相等进行截面等效, 等效为厚度 143 mm 的 1 块板。对于鞍座腹板, 实际中其为圆曲线, 在建模中以折代曲(见图 11)。

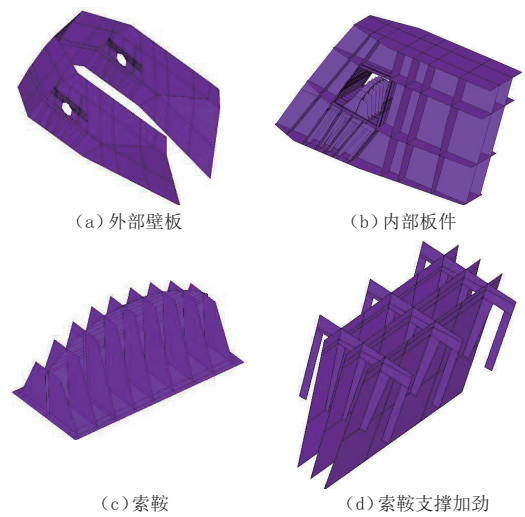


图 11 塔顶横梁板件有限元模型

3.2 应力结果分析

本节均按照基本组合工况对桥塔进行应力分析。除外壁板、索鞍以外的横梁板件 Von Mises 应力云图、竖向应力云图、纵桥向应力云图、横桥向应力云图见图 12。

由图 12 可知,最大 Von Mises 应力为 199.0 MPa、竖向应力为-217.2 MPa、纵桥向应力为-197.2 MPa、横桥向应力为 143.2 MPa。

索鞍底板位置示意图见图 13,其 Von Mises 应力

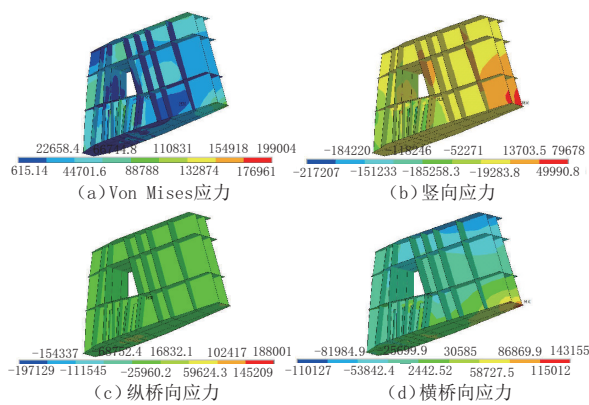


图 12 横梁主要受力板件的应力云图(单位:kPa)

云图、纵桥向应力云图、横桥向应力云图见图 14。

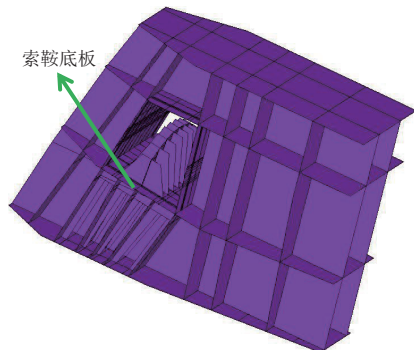


图 13 索鞍底板位置示意图

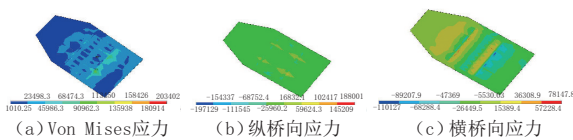


图 14 索鞍底板应力云图(单位:kPa)

由图 14 可知,其最大 Von Mises 应力为 203.4 MPa、纵桥向应力为-197.1 MPa、横桥向应力为-110.1 MPa。

横梁水平板件位置示意图见图 15,其 Von Mises 应力云图、横桥向应力云图见图 16。

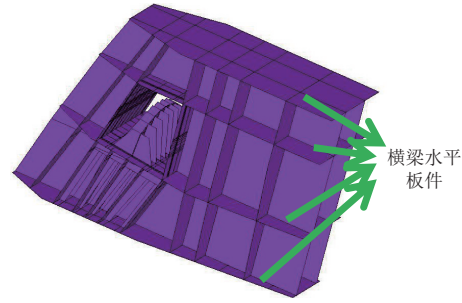


图 15 横梁水平板件位置示意图

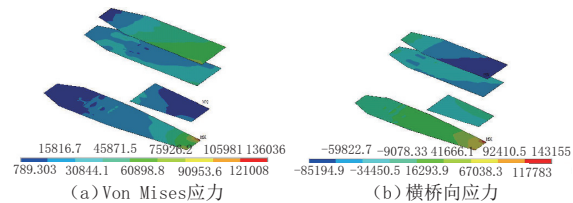


图 16 横梁水平板件应力云图(单位:kPa)

由图 16 可知,其最大 Von Mises 应力为 136.0 MPa、横桥向应力为 143.2 MPa。

索鞍纵桥向支承加劲位置示意图见图 17,其 Von Mises 应力云图、竖向应力云图见图 18。

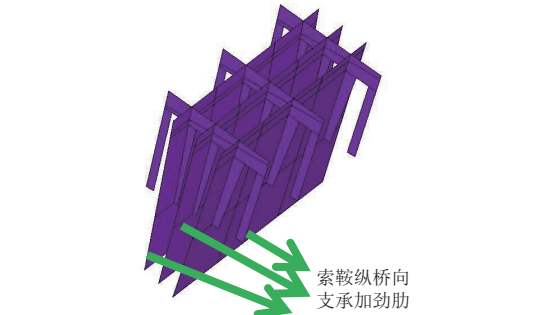


图 17 索鞍纵桥向支承加劲位置示意图

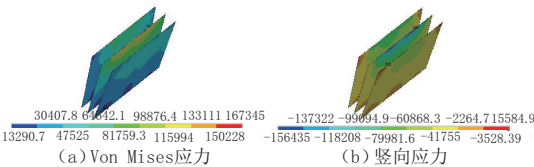


图 18 索鞍纵桥向支承加劲应力云图(单位:kPa)

由图 18 可知,其最大 Von Mises 应力为 167.3 MPa、竖向应力为-156.4 MPa。

索鞍横桥向支承加劲位置示意图见图 19,其 Von Mises 应力云图、竖向应力云图见图 20。

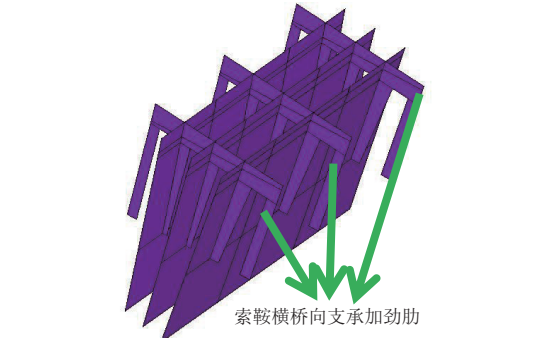


图 19 索鞍横桥向支承加劲位置示意图

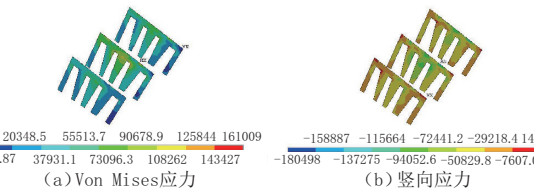


图 20 索鞍横桥向支承加劲应力云图(单位:kPa)

由图 20 可知,其最大 Von Mises 应力为 161.0 MPa、竖向应力为-180.5 MPa。

索鞍底板以下纵桥向与横桥向腹板位置示意图见图 21,其 Von Mises 应力云图、竖向应力云图见图 22。

由图 22 可知,其最大 Von Mises 应力为 192.6 MPa、竖向应力为-217.2 MPa。

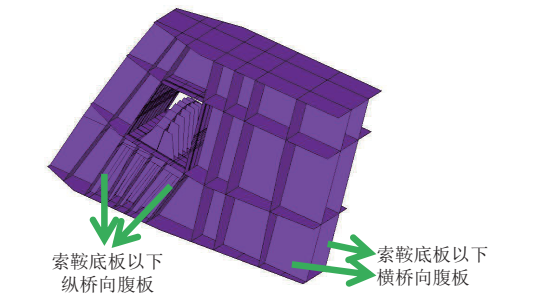


图 21 索鞍底板以下纵桥向与横桥向腹板位置示意图

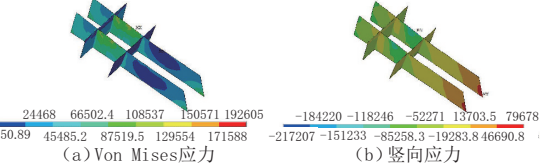


图 22 索鞍底板以下纵桥向与横桥向腹板应力云图(单位:kPa)

索鞍底板以上纵桥向与横桥向腹板位置示意图见图 23,其 Von Mises 应力云图、竖向应力云图见图 24。

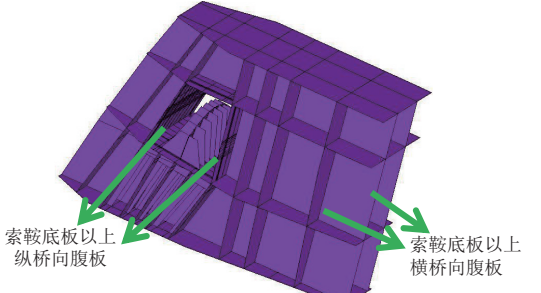


图 23 索鞍底板以上纵桥向与横桥向腹板位置示意图

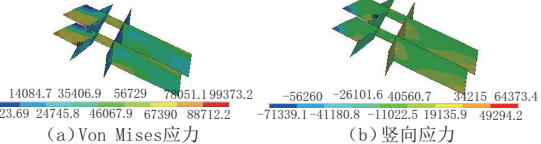


图 24 索鞍底板以上纵桥向与横桥向腹板应力云图(单位:kPa)

由图 24 可知,其最大 Von Mises 应力为 99.4 MPa、竖向应力为-71.3 MPa。

3.3 传力机理分析

3.3.1 基于应力云图分析

索鞍以上横梁板件主要承受横桥向弯矩作用,而对于索鞍传递的竖向轴力,主要由索鞍纵横桥向支承加劲、索鞍底板以下纵桥向与横桥向腹板传递给钢塔柱。

对于 3 块索鞍纵桥向支承加劲板,中间位置的支承加劲板起到主要传力作用,将竖向轴力传递到索鞍底板以下横桥向腹板;对于 3 块索鞍横桥向支承加劲,各自分担的轴力较为均匀;对于索鞍底板以下纵桥向腹板,其各自分担的轴力也较为均匀;对于索鞍底板以下横桥向腹板,其在索鞍正下方位置传递

轴力效应较为明显。

3.3.2 基于截面内力分析

为分析索鞍空间传力机理,在结构中选择3个截面进行分析:截面1为与索鞍底面直接接触的截面;截面2为塔顶横梁底面截面(横桥向支承加劲在此消失);截面3为钢塔柱内截面(纵桥向支承加劲在此消失)。由于索鞍主要传递主缆施加的竖向轴力,因此对这3个截面各板件承受的竖向轴力进行分析,可得到各截面承受的竖向轴力变化。

截面1、2、3中各板件承受的竖向轴力如表1所示,由此得出结论:

(1)对比截面1各板件承受的竖向轴力大小可知,索鞍纵桥向支承加劲板起到了主要的竖向轴力传递作用,承受竖向轴力总和为66 426 kN,占到所有总和的52%;而对于这3块索鞍纵桥向支承加劲板件,中间1块板件又起到主要的竖向轴力传递作用。

(2)对比截面1与截面2各板件承受的竖向轴力大小可知,索鞍纵桥向支承加劲所承受的竖向轴力显著减小,仅占到总和的30%;而纵横桥向腹板及外壁板承受的竖向轴力显著增加。即索鞍纵横桥向加劲板承受的竖向轴力由上自下向纵横桥向腹板及外壁板进行了转移。

(3)对比截面2与截面3各板件承受的竖向轴力大小可知,由于索鞍纵桥向支承加劲板在此截面消失,则竖向轴力完全由纵横桥向腹板及外壁板承受。纵横桥向腹板、外壁板承受的竖向轴力值相差较小。

表1 各板件承受的竖向轴力			单位:kN
板件名称	截面1	截面2	截面3
索鞍纵桥向支承加劲(中间板件)	39 820	16 019	0
索鞍纵桥向支承加劲(两侧板件)	26 606	23 118	0
索鞍横桥向支承加劲(中间板件)	11 313	0	0
索鞍横桥向支承加劲(两侧板件)	13 727	0	0
纵桥向腹板	4 930	31 821	38 575
横桥向腹板	23 290	28 010	43 950
外壁板	8 362	29 396	45 979

4 结 语

(1)该工程中桥塔主索鞍的位置由于受到高度的限制,主索鞍的下横梁结构高度较低,满足不了索鞍对桥塔横梁产生的横桥向巨大弯矩,因此设计中利用主索鞍上下SY1+SY2形成的高3.62 m箱室及SY3+SY4形成的高2.5 m箱室共同组成“桁架上下弦杆”,利用SY2及SY3之间部分形成“桁架腹杆”,使桥塔桁架式横梁高度达到了11.3 m,可满足桥塔横梁的受力需要。

(2)索鞍以上横梁板件主要承受横桥向的弯矩作用,索鞍传递的竖向轴力首先由索鞍纵横桥向支承加劲板件承受,其中索鞍纵桥向支承加劲的中间1块板件起到最主要的作用;然后竖向轴力向塔柱传递时,竖向轴力逐渐由索鞍纵桥向支承加劲向纵横桥向腹板和外壁板转移,从而向下传递给钢塔柱。

参考文献:

[1] 吴巨军,李茜茜,周平槐.钢-混组合桥塔技术创新进展[J].中国市政工程,2025(1):126-130;151.

[2] 俞欣.钢桥塔及组合桥塔设计方法与受力性能试验研究[D].西安:长安大学,2008.

[3] 高晓沛,张伟,康福军,等.钢塔-组合塔混合结构结合部承载性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2024,26(4):70-76;120.

[4] 张喜刚,刘高,高原,等.中空型外壁钢板-混凝土组合桥塔塔柱承载力研究[J].土木工程学报,2018,51(3):90-98.

[5] 余文洋.斜拉桥拱形钢桥塔受力分析与设计[D].成都:西南交通大学,2018.

[6] 董创文,洪志鑫,李传习.基于正交试验法的主索鞍合理结构优化研究[J].湖南交通科技,2024,50(4):98-105.

[7] 韩吉锋.自锚式悬索桥主鞍座选型与设计[J].中国公路.2015(21):140-141.

[8] 王静,李东胜,贺鹏,等.主跨2×428 m三塔自锚式悬索桥主塔的组合塔段设计[J].公路,2024,69(8):62-65.

[9] 曹发辉,刘清华,左翔文.强震山区大跨悬索桥桥塔横梁方案比选[J].桥梁建设,2021,51(5):108-115.

[10] 郑瑞.矩形多格室高性能钢-混凝土组合桥塔轴心受压性能研究[D].重庆:重庆大学,2018.

[11] 郑佳龙.斜拉桥混合塔结构受力性能研究[D].福州:福州大学,2025.

[12] 叶勇.自锚式悬索桥钢混结合段受力性能研究[D].成都:西南交通大学,2023.