

自锚式悬索桥混凝土主缆锚固区受力特性研究

吴德宝

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 为研究双边箱主梁自锚式悬索桥主缆锚固区的传力机制及应力分布,以某实际双边箱主梁自锚式悬索桥为例,采用 MIDAS 建立杆系全桥模型来验证 ANSYS 实体模型的准确性,并结合 ANSYS 有限元软件的最不利工况(主缆力最大时)下锚固区实体模型,研究了双边箱锚固区在三向预应力、主缆力等作用下端横梁、次横梁、散索区等主要部位的应力云图,得到了双边箱混凝土主缆锚固区的传力路径和应力分布规律。结果表明:实体局部模型与整体模型仅有 3.8% 的竖向力误差,间接验证了实体局部模型的准确性;主缆力快速通过后锚板扩散至端横梁,顺桥向压应力从后锚面最大值 -7.07 MPa ,在端横梁范围内迅速扩散下降至 -1.6 MPa ,再由端横梁传递给纵向箱室;锚固段散索区混凝土主应力为 -1.1 MPa ,在三向预应力作用下,受力状态良好;双边箱结构传力路径明确,顺桥向传递路径为:主缆→主缆锚板→散索区混凝土→端横梁→锚固段主梁。

关键词: 自锚式悬索桥;主缆锚固区;受力特性;有限元分析

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0091-06

Study on Stress Characteristics of Anchorage Zone of Main Concrete Cable of Self-anchored Suspension Bridge

WU Debao

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In order to study the force transmission mechanism and stress distribution of the main cable anchorage zone of a double-sided box girder self-anchored suspension bridge, taking an actual double-sided box girder self-anchored suspension bridge as an example, Midas is used to establish a full bridge model of the rod system to verify the accuracy of the ANSYS solid model. Combined with the physical model of the anchoring zone under the most unfavorable working conditions (when the main cable force is maximum) in the ANSYS finite element software, the stress cloud maps of the main parts such as the end crossbeam, secondary crossbeam and loose cable area of the double-sided box anchoring zone under the action of three-directional prestress and main cable force are studied. The force transmission path and stress distribution law of the anchoring zone of the double-sided box concrete main cable are obtained. The results indicate that there is only a 3.8% vertical force error between the solid local model and the overall model, which indirectly verifies the accuracy of the solid local model. The main cable force quickly spreads to the end crossbeam through the rear anchor plate, and the compressive stress along the bridge direction decreases rapidly from the maximum value of -7.07 MPa on the rear anchor surface to -1.6 MPa within the range of the end crossbeam, and then transmitted to the longitudinal box chamber by the end crossbeam. The main stress of the concrete in the scattered cable area of anchorage section is -1.1 MPa . The stress state is good under the action of three-directional prestress. The force transmission path of the double-sided box structure is clear, and the transmission path along the bridge is the main cable → main cable anchor plate → scattered cable area concrete → end crossbeam → girder of anchorage section.

Keywords: self-anchored suspension bridge; main cable anchorage zone; force characteristics; finite element analysis

0 引言

自锚式悬索桥因无体量庞大的锚碇,场地限制较小,结构轻巧美观,在软基区域和中小跨径范围内

具有强大优势^[1]。现状道路规划往往对桥宽需求较大,其中双边箱主梁的结构形式在桥宽较大的桥梁结构中应用较为广泛^[2-4]。自锚式悬索桥的主缆自锚体系主缆索力较大,锚固区的主缆需散索后锚固于梁端,后锚固区梁高需特殊设计。

主缆锚固区受力复杂,其构造和传力分析是自锚式悬索桥设计的关键问题之一。周加生等^[5-6]对自锚式钢箱梁悬索桥锚固区的传力路径进行研究,

收稿日期: 2024-10-22

基金项目: 上海市科技计划项目(21DZ1202900)

作者简介: 吴德宝(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

得到了钢箱梁式主缆锚固区域的应力分布和传力途径;韩雪等^[7]对自锚式钢结构悬索桥主缆锚固区的缩尺模型进行试验研究,分析了主缆锚固区的受力性能;李明颖等^[8]对主缆锚固局部受力板壳有限元模型进行分析,得到了最不利荷载工况下铸钢锚碇等主要板件的受力特性,揭示了主缆轴力在主梁内部的传力机理及分配模式;秦凤江等^[9]研究了大跨自锚式悬索桥主缆锚固区的受力机理,以1:5的缩尺模型进行试验研究,并将试验结果与有限元分析结果进行了比对。根据上述研究现状可知,目前学者们对自锚式悬索桥的钢结构、整体式截面混凝土锚固段进行了较为全面的研究^[10-13],但对双边箱混凝土锚固段的具体受力特性和传力路径研究较为欠缺,需要进行专门研究。

本文以某实际自锚式双边箱悬索桥为工程背景,利用MIDAS有限元软件建立全桥杆系模型,并利用ANSYS有限元软件建立最不利工况下的锚固段实体受力模型。通过对比特定参数,验证了实体模型的准确性,同时结合最不利工况下的实体模型,验证了双边箱锚固段横梁配束,分析了端横梁、次横梁、散索区等主要部位的应力云图,得到了双边箱混凝土锚固段的传力路径和应力分布规律。

1 工程概况

该桥为130 m+336 m+130 m双塔双索面混合梁自锚式悬索桥,跨中主缆垂度65 m,矢跨比1:5.17,梁端主缆锚固区为混凝土双边箱主梁,锚固段长度约22 m,中间主梁为分离式双钢箱。主桥钢梁处宽33 m,钢梁处吊杆间距为12 m;锚固段桥宽36.6 m,混凝土锚固区无吊杆。

主桥总体立面布置图见图1。

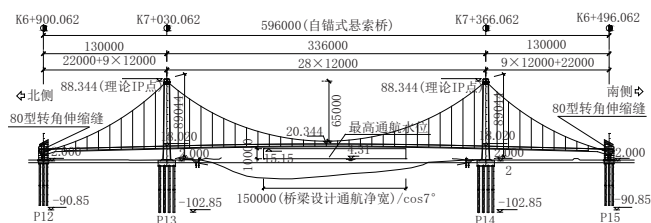


图1 主桥总体立面布置图(单位:mm)

混凝土锚固区的主梁为双边箱,单箱宽度为7.23 m,箱间间距为17.14 m,截面中心高度为3.2~5.88 m,桥宽36.6 m,其横断面布置见图2(a)。锚固区共设置3道横梁,其中1道端横梁,2道普通横梁,如图2(b)、(c)所示。图2(d)为锚固区平面布置图,其中端横梁充当盖梁,边墩支座间距为16.3 m,牛腿

个数共6个。

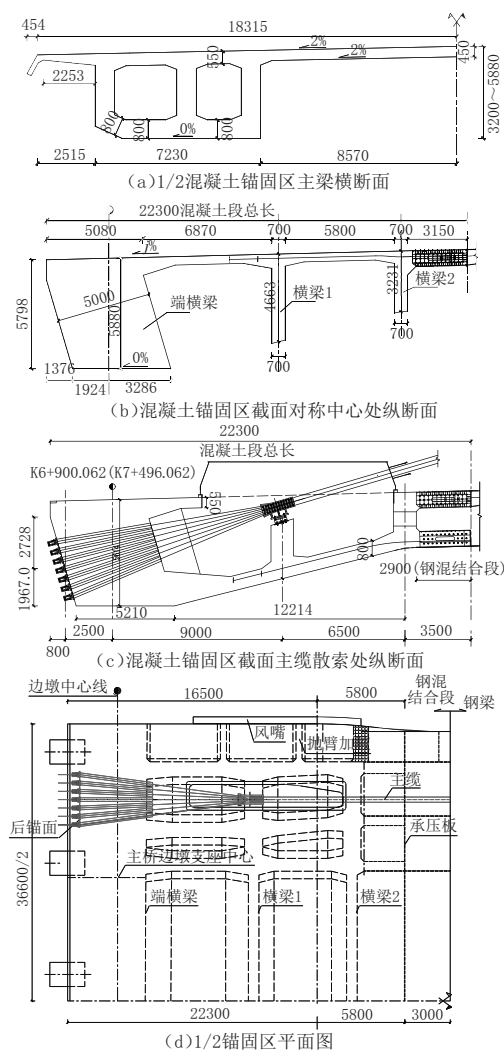


图2 锚固区构造示意图(单位:mm)

2 有限元模型

2.1 全桥杆系模型

总体计算采用MIDAS程序。主缆和吊索采用弹性索单元模拟,主梁、索塔和桥墩采用梁单元模拟。主缆与索塔顶端、主缆锚固点与主梁末端采用主从约束,主梁为半飘3跨连续梁体系,主梁在索塔处限制单侧横向位移和竖向位移,在边墩处限制竖向位移和单侧横向位移,塔底、边墩底固结^[14]。空间杆系计算模型见图3。

由于悬索桥的第1根吊杆与主缆锚固点距离较大,中间段正弯矩为截面的控制关键。提取全桥模型的基本组合正弯矩(见图4),在横梁2位置,梁高最小,正弯矩最大,是整个锚固段的薄弱点(该处弯矩最大时,主缆力也接近最大值)。

2.2 MIDAS模型荷载工况

钢混结合段处为整体结构控制断面。提取该处

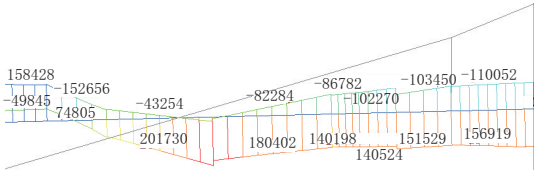
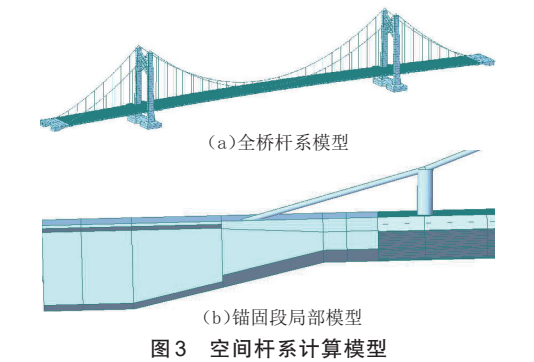


图4 全桥模型锚固段承载力组合弯矩(单位:kN·m)

最大弯矩对应的荷载,用于 ANSYS 实体分析^[15]。MIDAS 的荷载工况考虑见表 1。

表 1 承载力组合

荷载工况	系数
结合段正弯矩最大对应汽车活载布置(ST)	1.40
结合段正弯矩最大对应人群布置(ST)	1.05
合计(CS)	1.00
钢束 1 次(CS)	1.00
钢束 2 次(CS)	1.00
徐变 2 次(CS)	1.00
收缩 2 次(CS)	1.00

2.3 ANSYS 实体模型荷载工况

ANSYS 模型对照 MIDAS 全桥模型提取的内力作为实体模型的荷载工况:

- (1) 1.2×恒载:自重+小箱梁恒载+栏杆。
- (2) 1.4×汽车+1.05×人群。
- (3) 吊杆力+主缆力+横断面内力。

MIDAS 模型基本组合对应的内力为:主缆力 50 374 kN,吊杆力 5 321 kN;小箱梁恒载竖向力:边牛腿 1 962 kN,中牛腿 3 539 kN。钢梁边界对应内力如表 2 所示。

表 2 MIDAS 模型提取的实体模型钢梁边界对应内力

剪力/kN		扭矩/(kN·m)	弯矩/(kN·m)	
Y 向	Z 向		Y 向	Z 向
-86	220	-1 523	61 442	839

2.4 ANSYS 实体模型

以该桥 1/2 的锚固段为研究对象,采用大型有限元软件 ANSYS 对其进行受力分析。根据圣维南原理,选取 1/2 锚固段、钢混结合段及部分钢梁段,共 31.297 m,如图 5 所示。

采用 ANSYS 建模时,锚碇、锚固钢管和锚固钢板

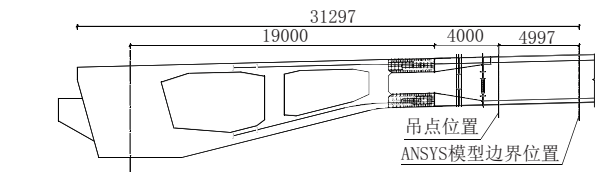


图5 锚固区+钢混结合+部分钢梁段(单位:mm)

采用 solid45 单元,钢梁部分为 shell63 单元,预应力钢筋为 link8 单元,如图 6 所示。

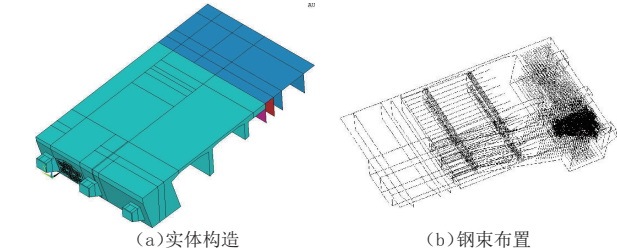


图6 双边箱主梁锚固区 ANSYS 模型

约束:模型顺桥向跨中侧建立刚性梁单元,刚性梁单元的端节点与钢梁端节点建立主从约束;模型顺桥向锚固端建立竖向支座,约束其顺桥向、竖向位移,力学边界约束如图 7 所示。模型横桥向建立对称约束。锚垫板与锚下钢板、锚下钢板与混凝土接触面采用 ceintf 命令,在接触面生成点与面的约束方程。

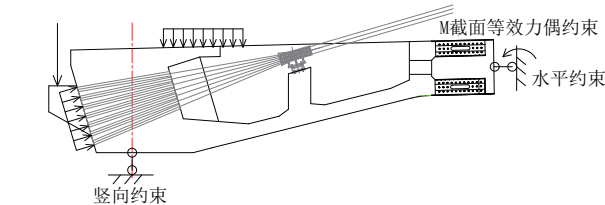


图7 锚固段实体力学边界约束

荷载:模型中施加的荷载包括自重、预应力、车辆荷载、人群荷载、主缆力、吊杆力、牛腿力及横断面内力;边支座竖向支撑,桥梁结构中心线对称约束,钢梁边界处横断面纵向约束。

2.5 模型结果对比

提取 ANSYS 和 MIDAS 模型在同一工况下的边支座支反力(图 7 的竖向约束)、主梁内力(图 7 的水平约束),结果见表 3。

表 3 ANSYS 和 MIDAS 边界约束力对比

约束	约束力/kN		误差/%
	ANSYS	MIDAS	
竖向	29 624	30 801	3.8
水平	48 901	53 489	8.6

由表 3 可知,ANSYS 和 MIDAS 模型竖向约束力误差为 3.8%、水平约束力误差为 8.6%,验证了 ANSYS 有限元模型有较高的准确性;存在误差可能是 ANSYS 模型相对于 MIDAS 模型未考虑混凝土的收

缩徐变影响。

3 有限元计算分析

对 ANSYS 实体模型的钢束、混凝土、钢管分别进行静力分析。

3.1 钢束内力分析

图 8 为钢束应力云图。由图 8 可见,钢束有效应力为 1 000~1 100 MPa,仅端横梁的端部和纵向钢束锚固点处的有效应力较小,仅约为 950 MPa。

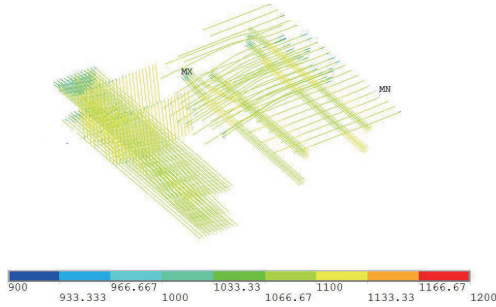


图 8 钢束应力云图(单位:MPa)

3.2 混凝土内力分析

图 9 为混凝土应力云图。由图 9 可见,锚固段的混凝土应力值大部分为-6~1 MPa,仅吊点位置、结合位置、牛腿根部有局部拉应力达到 8.4 MPa。分析原因是模型吊点位置采用小面积约束模拟,结合段过渡位置未按实际渐变详细模拟,牛腿位置模型中未配置普通钢筋。从总体来看,锚固段受力较为合理。

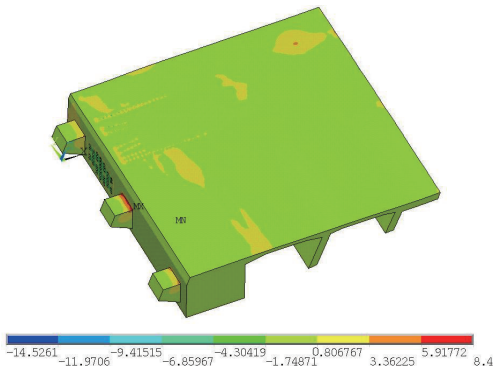


图 9 混凝土应力云图(单位:MPa)

主缆散索处应力较为复杂,后锚面应力和前锚面主应力如图 10、图 11 所示。

由图 10 可知,后锚面最大主压应力为-5.6 MPa,主拉应力为 1.67 MPa;后锚面压应力集中于锚板下缘,处于受压状态,应力多为-2~-4 MPa;锚面外延存在混凝土受拉,拉应力在 1 MPa 水平。

由图 11 可知,前锚面拉应力集中于锚板下缘,处于受拉状态,应力多处于-1 MPa 以内,小部分应力达到了 2 MPa;前锚面外延存在混凝土受拉,拉应力在

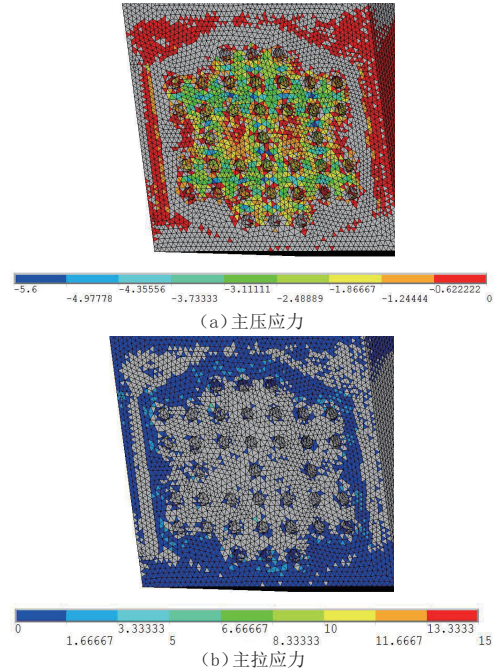


图 10 后锚面主应力云图(单位:MPa)

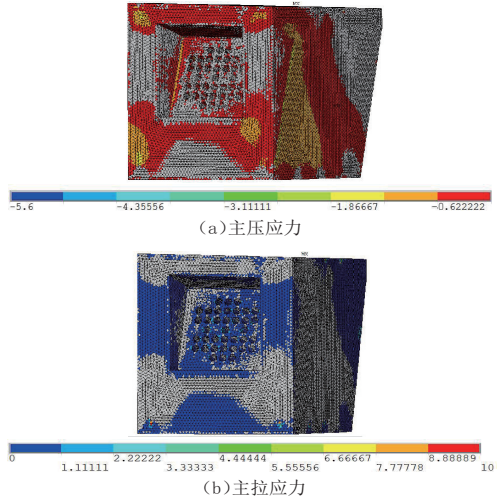


图 11 前锚面主应力云图(单位:MPa)

1 MPa 水平。

散索处混凝土的纵向受力如图 12 所示。

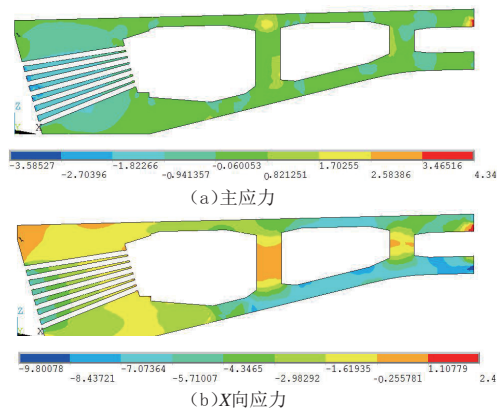


图 12 散索处顺桥向剖面应力(单位:MPa)

由图 12 可见,后锚面最大顺桥向压应力为-7.07 MPa,前锚面最大顺桥向拉应力为 1.11 MPa。

局部节点位置出现有 15 MPa 的拉应力,是 ANSYS 模拟时钢束边界点锚后引起的应力集中。结果表明,应力从后锚面处 7 MPa 左右逐渐下降到 1 MPa 左右,说明锚下钢板很好地将应力从后锚面传递给了锚下混凝土,并扩散到了端横梁范围内的混凝土。

3.3 混凝土横梁分析

3.3.1 端横梁(X= 3 300)

端横梁应力云图见图 13。

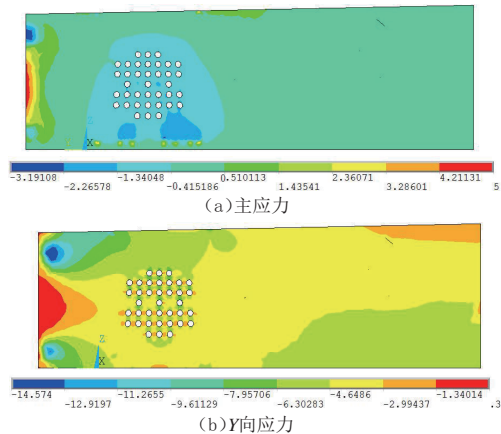


图 13 端横梁应力云图(单位:MPa)

由图 13 可见,端横梁跨中顶部横桥向压应力为-3 MPa,底部横桥向压应力为-6.3 MPa,仅在端横梁梁端顶底横梁钢束结束点有应力集中现象,压应力值达-14.6 MPa;在端横梁主缆孔位置,主压应力为-1.34~-3.19 MPa。

3.3.2 横梁 1(X=12 300)和横梁 2(X=18 798)

横梁 1、2 的应力云图见图 14、图 15。

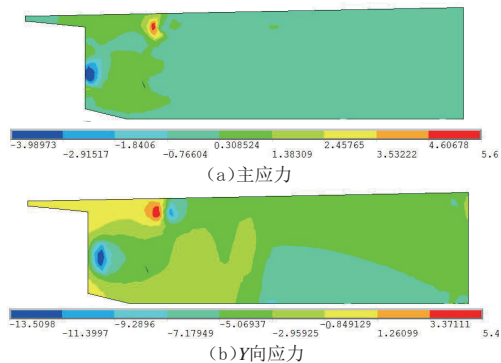


图 14 横梁 1 应力云图(单位:MPa)

由图 14、图 15 可知,横梁 1 的主应力主要分布在-0.7~0.3 MPa 范围,横梁 2 的主应力主要分布在-0.5~0.5 MPa 范围。横梁 1 和横梁 2 的跨中横桥向压应力为-3~-5 MPa,且横向应力分布均匀。仅在横梁梁端顶底横梁钢束结束点有应力集中现象,压应力值达-15.7 MPa,为 ANSYS 线单元边界简化导致的应力集中。

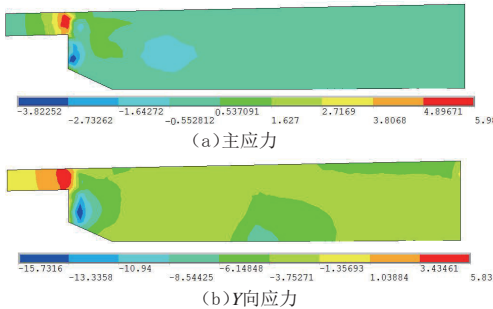


图 15 横梁 2 应力云图(单位:MPa)

3.4 混凝土纵向剖面分析

3.4.1 箱室处

箱室处纵剖面应力云图见图 16。结构中心线处纵剖面应力见图 17。

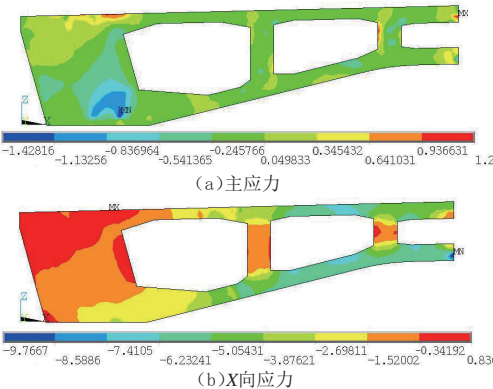


图 16 箱室处纵剖面应力云图(单位:MPa)

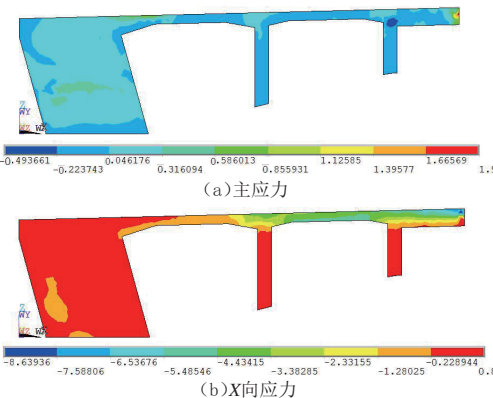


图 17 结构中心线处纵剖面应力云图(单位:MPa)

对于锚固段采用混凝土双边箱的自锚式悬索桥,横梁+纵梁相结合的体系,能减少锚固段的自重。由前述可知,后锚面最大顺桥向压应力为-7.07 MPa,前锚面最大顺桥向拉应力为 1.11 MPa,锚固段散索区混凝土主应力为-1.1 MPa,在三向预应力作用下,散索区混凝土受力状态良好。

由图 16、图 17 可知,箱室处主应力为-0.24 MPa,在三向预应力作用下,锚固区应力水平良好。由图 17(b)可知,非主缆箱式纵向应力从端部(端横梁)应力-0.8 MPa,在第 1 箱室顶底板应力达 2.1 MPa,沿着

纵向增到-5 MPa(横梁1),再到6.2 MPa(横梁2)。

3.4.2 散索处

端横梁散索处,纵向应力从端部(梁端)往跨中方向应力依次从-5.7 MPa到-2.9 MPa,再到-1.6 MPa,应力在端横梁范围内快速扩散。并在第1箱室顶底板应力达到-3 MPa,沿着纵向增到-5.7 MPa(横梁1),再到-7.0 MPa(横梁2)。

散索处纵向应力变化见图18。

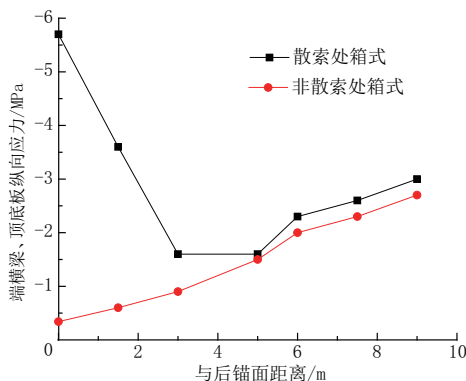


图18 散索区主梁及端横梁纵向应力

由图18可知,主缆力在端横梁处已经较为充分地通过锚板传递给端横梁(0~5 m为端横梁范围),再由端横梁传递给纵向腹板和顶底板。距后锚面6~10 m范围的应力随着距离增加而增大,主要由结合段处纵向预应力钢束和主梁梁高往结合段靠近时降低而引起。

双边箱结构传力路径明确,应力传递流畅,顺桥向传递路径为:主缆→主缆锚板→散索区混凝土→端横梁→锚固段主梁;横桥向传递路径为:桥面荷载→顶板→横梁腹板→顺桥向主梁腹板→锚固段主梁。

4 结 语

(1)对于锚固段采用混凝土双边箱的自锚式悬索桥,横梁+纵梁相结合的体系,能减少锚固段的自重,传力路径明确。

(2)后锚面最大顺桥向压应力为-7.07 MPa,前锚面最大顺桥向拉应力为1.11 MPa。锚固段散索区混

凝土主应力为-1.1 MPa,在三向预应力作用下,散索区混凝土受力状态良好。

(3)主缆力在端横梁处已经较为充分地通过锚板传递给端横梁,再由端横梁传递给纵向腹板和顶底板。

(4)双边箱结构传力路径明确,应力传递流畅,顺桥向传递路径为:主缆→主缆锚板→散索区混凝土→端横梁→锚固段主梁;横桥向传递路径为:桥面荷载→顶板→横梁腹板→顺桥向主梁腹板→锚固段主梁。

参考文献:

- [1] 董鹏宇, 缪长青, 葛付何. 某自锚式悬索桥主缆锚固区力学性能[J]. 中国科技论文, 2023, 18(2): 131-136.
- [2] 常付平. 舟山市小干二桥工程主桥设计[J]. 桥梁建设, 2016(6): 83-87.
- [3] 梁立农, 刘安兴, 郭文华, 等. 一种正交异性钢桥面板与超高性能混凝土组合桥: CN202020090972.5[P]. 2024-10-23.
- [4] 吴志达. 超宽双边箱钢主梁剪力滞效应分析与实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [5] 周加生. 自锚式钢箱梁悬索桥主缆锚固区三维仿真分析研究[J]. 隧道与轨道交通, 2022(2): 10-12.
- [6] 陈国红, 宋晓莉. 桃花峪黄河大桥吊杆—主梁锚固区受力分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 44-50.
- [7] 韩雪, 李海峰. 某自锚式钢结构悬索桥主缆锚固区力学性能研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(12): 30-35.
- [8] 李明颖, 欧光颀, 弓正, 等. 428 m跨自锚式悬索桥主缆锚固区局部应力分析[J]. 公路交通科技(增刊1), 2021(38): 26-33.
- [9] 秦凤江, 涂熙, 狄谨, 等. 大跨度自锚式悬索桥主缆锚固区受力机理分析[J]. 建筑结构, 2020(增刊2): 209-215.
- [10] 刘孝武, 陈沁恺. 自锚式悬索-斜拉协作体系桥梁主缆锚固区空间受力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(8): 69-72.
- [11] 文清良, 廖东阳. 混凝土自锚式悬索桥主缆锚固区应力分析[J]. 城市道桥与防洪, 2013(7): 76-77.
- [12] 戴伟, 万杰龙, 贺欣怡. 宽箱梁自锚式悬索桥主缆锚固区受力分析[J]. 上海公路, 2023(4): 53-57.
- [13] 许骏. 自锚式悬索桥锚固段合理总体布置研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(5): 73-75.
- [14] 陈逸群, 许骏. 先斜拉后悬索组合梁自锚式悬索桥桥面板浇筑方案研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023(4): 172-175.
- [15] 柯红军, 李传习. 基于ANSYS的自锚式悬索桥有限元建模和分析方法[J]. 交通信息与安全, 2008, 26(5): 131-135.