

自锚式悬索-斜拉协作体系桥梁主缆锚固区空间受力分析

刘孝武¹, 陈沁凯²

[1.宁波市绕城高速连接线建设有限公司, 浙江 宁波 315000; 2.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: 主缆锚固区作为自锚式悬索-斜拉协作体系桥梁的关键结构,承担着将巨大的主缆轴力均匀传递到加劲梁全截面的重要作用。为研究主缆锚固区的受力状况和主缆力的传递规律,以 60 m 航空限高条件下主跨 420 m 自锚式悬索斜拉协作体系桥梁方案为背景,建立板壳-实体有限元模型,对大跨度自锚式协作体系桥主缆锚固区各板件进行空间受力分析,得出锚固区主要板件受力的应力水平和分布情况,以及锚体中混凝土对锚固区板件应力的影响作用,对主缆锚固区结构设计的合理性和安全性进行了验证。

关键词: 自锚式悬索-斜拉协作体系桥;主缆锚固区;有限元法;受力分析

中图分类号: U441+.5;U448.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2024)08-0069-04

0 引言

自锚式悬索-斜拉协作体系桥梁(以下简称自锚式协作体系桥)融合了自锚式悬索桥以及斜拉桥的结构优势,在保证通航净空的条件下,可有效降低塔高以满足航空限高要求。同时,与传统地锚式悬索桥相比,该桥型不需修建庞大的锚碇,对建桥地质条件适应性强^[1-3]。

自锚式协作体系桥梁将主缆锚固在纵向加劲梁的端头,通过主缆锚固区将巨大的主缆轴力均匀传递到加劲梁全截面,因此,主缆锚固区是关系到自锚式协作体系桥安全的重要构件^[4-6]。目前,常见的主缆锚固形式主要有混凝土结构锚固、钢结构锚固、钢-混组合结构锚固和环形锚固四种^[7]。

本文 60 m 航空限高条件下主跨 420 m 的自锚式悬索斜拉协作体系桥梁方案,其主桥结构采用自锚式悬索-斜拉协作体系,结构受力复杂。由于受建设条件限制,其恒载下单根主缆达 10 000 t 左右,远大于一般的自锚式悬索桥,所以采用受力相对简单可靠、可施工性好、造价相对合理的主缆锚固形式是其主桥结构设计的关键点之一。

1 工程概况

该桥梁方案主桥采用自锚式悬索-斜拉协作体

系,其主跨跨径为 420 m,主桥全长为 820 m,双向 8 车道,主塔、主梁材料均采用 Q345qD。桥梁总体布置如图 1 所示。

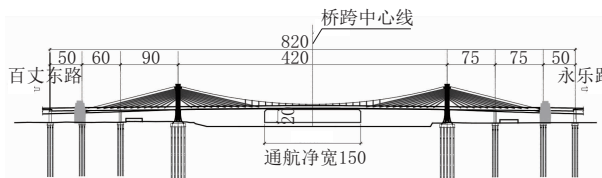


图 1 桥梁方案总体布置图(单位:m)

主塔高 60 m,采用门形钢结构框架塔,主梁采用等截面钢箱梁,标准段高度为 4.5 m。主缆垂跨比为 1/14.6,在边跨处采用钢结构锚固箱自锚于锚墩墩顶处主梁。

为保证主缆在锚墩处有足够的锚固空间,在主梁锚墩约 23 m 范围内将主梁标准段钢箱梁加高至 8.0 m,以满足主缆通过散索套后散开锚固的空间要求。同时,在锚墩支座两侧合适的锚固端范围内进行混凝土填芯压重,以平衡主缆的竖向分力并预留足够的压力储备。

钢结构锚固端总长 23 m,锚固端梁高由标准段 4.5 m 渐变至 8.0 m。主缆与主梁夹角约 14.1°,主缆通过锚固端顶板的开孔进入到锚固端箱室结构内部,通过散索套后散开为单股索股,锚固在锚固面上。主缆散索的距离约为 12~13 m,索股最大散开角度约为 9.6°。散索套布置在箱室结构内部,可以避免散索套布置在桥面上给桥上景观造成的不利影响。

钢结构锚固端布置如图 2 各图所示。

收稿日期: 2023-11-21

作者简介: 刘孝武(1974—),男,硕士,高级工程师,从事工程管理工作。

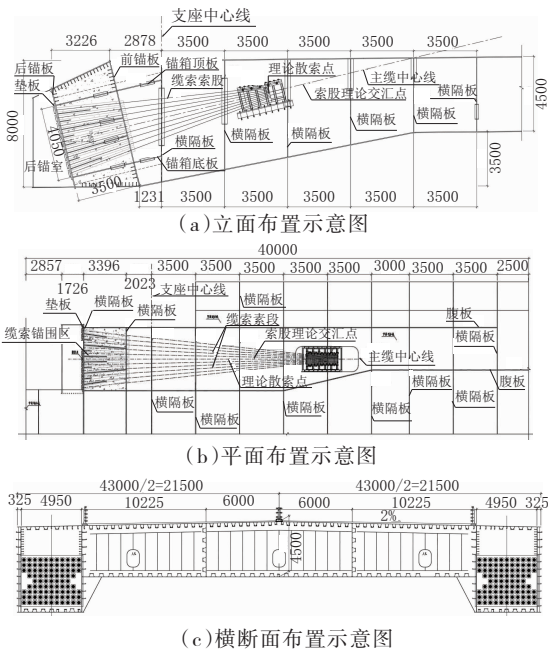


图2 钢结构锚固端布置(单位:mm)

2 有限元分析

2.1 有限元模型

根据圣维南原理,取足够长的梁段使模型边界作用力或作用位移不影响研究区域的应力与位移分布,主梁梁段截取墩中心主跨侧跨侧梁段 24.0 m、边跨侧梁段 18.5 m,总长 42.5 m,根据结构对称性,横向取一半结构作为分析模型,如图 3 所示。

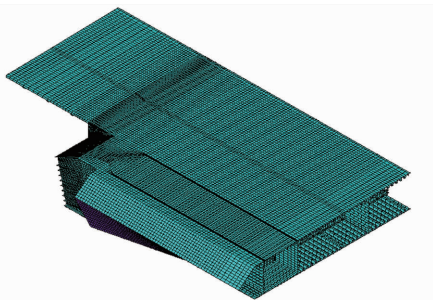


图3 主缆锚固区有限元模型

本次分析采用有限元软件 ANSYS 进行,钢结构部分采用三维板壳单元 Shell63,填充混凝土采用实体单元 Solid45。

在主梁梁段横向对称中心施加对称位移边界,在配跨梁端施加力边界,在主桥边跨梁端施加梁端固结位移边界,在主梁支座位置施加竖向位移边界。

在主缆端部通过锚垫板施加主缆拉力,方向指向主缆理论交汇点。

2.2 模型验证

主缆锚固区有限元模型的准确性对于其计算结果至关重要,为验证局部节点模型加载的准确性,对外部荷载和模型反力进行校核,确保加载准确、结果

可靠。验证结果见表 1,局部节点模型反力加载结果基本准确。

表 1 荷载单项支座反力 单位:kN

荷载工况	竖向分力	水平分力
一期	12 507	
二期	2 113	0
压重	26 429	
主缆分力	-25 090	105 690
梁端内力	726	7
反力合计	16 685	105 697
ANSYS 反力	16 519	105 317
反力误差	1%	0.3%

2.3 成桥恒载受力分析

在主缆拉力和结构成桥恒载作用下,主缆锚固区顶板、底板及主要板件应力分布如图 4 至图 8 所示。

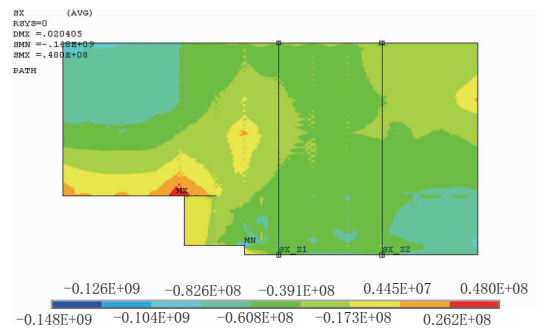


图4 顶板纵向正应力(单位:Pa)

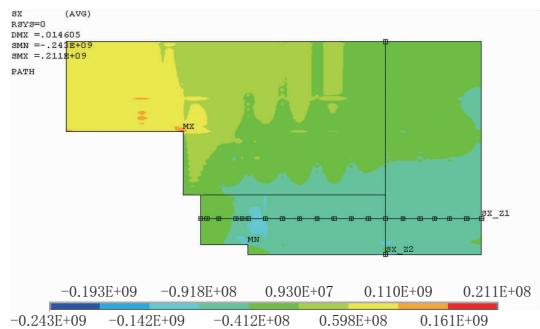


图5 底板纵向正应力(单位:Pa)

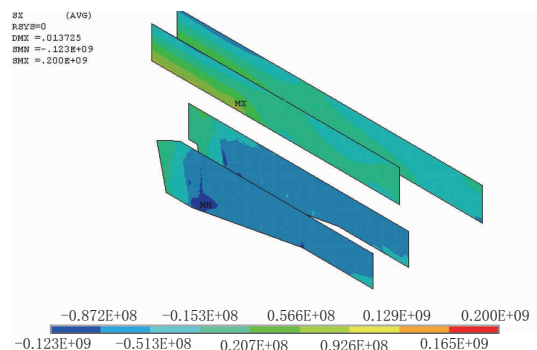


图6 锚固区腹板纵向正应力(单位:Pa)

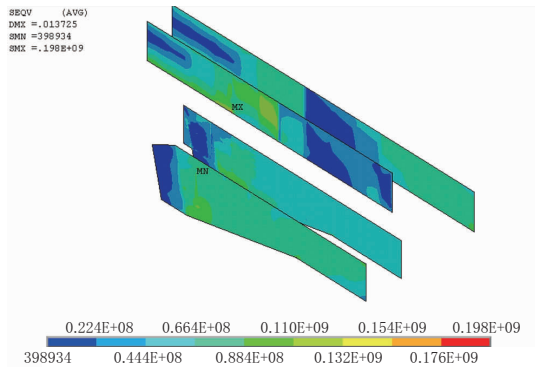


图7 锚固区腹板 Mises 应力(单位:Pa)

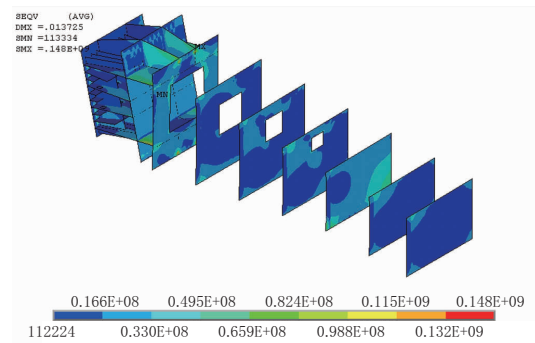


图8 锚固区加劲板 Mises 应力(单位:Pa)

由图4可知,在锚固段钢箱梁内,顶板基本处于受压状态,边箱范围内顶板压应力大于中间箱室顶板。除顶板变化处存在应力集中外,主缆锚固区顶板纵向最大压应力为-83 MPa,纵向最大拉应力为48 MPa,小于顶板设计强度,结构具有一定的安全储备。

由图5可知,不考虑应力集中区域,主缆锚固区底板纵向最大压应力为-94 MPa,底板纵向拉应力最大值为60 MPa,小于顶板设计强度,结构具有一定的安全储备。底板的应力略高于顶板,并且底板纵向应力在远离锚固面后逐渐趋于均匀。

由图6、图7可知,锚固区外侧腹板应力明显大于内侧腹板,外腹板压应力最大值-123 MPa, Mises 应力最大值126 MPa,小于腹板的容许应力,具有一定的安全储备。由分析结果可知,腹板承担着传递和扩散主缆轴力的主要作用,且相较于内侧腹板,外侧腹板的受力更为不利。

锚固区加劲板 Mises 应力分布如图8所示,由应力分布图可知,锚体顶、底最大应力为143 MPa;锚体内横隔板最大应力为148 MPa;锚固区水平加劲板最大应力为80 MPa,竖向加劲板最大应力为26 MPa,均小于各自的容许应力。计算分析表明:混凝土填充区加劲板应力较小,水平顶底板靠近腹板处应力较大。最大值出现在锚体顶底板加劲与横隔板相交处,应力峰值处横隔板面外受力,因此,增加

对应的短加劲适当过渡,以提高其面外刚度,保证结构受力安全。

2.4 不考虑锚下填混凝土作用的成桥恒载受力分析

在主缆锚固区中进行混凝土填芯压重,以平衡主缆的竖向分力并预留足够的压力储备。但由于混凝土存在着明显的收缩徐变效应以及施工过程中其密实性难以得到充分的保证,锚体中混凝土的效应不能完全发挥作用。本文针对上述情况,在不考虑锚体中填充混凝土作用的情况下,进行成桥恒载受力分析,计算结果图9至图12如所示。

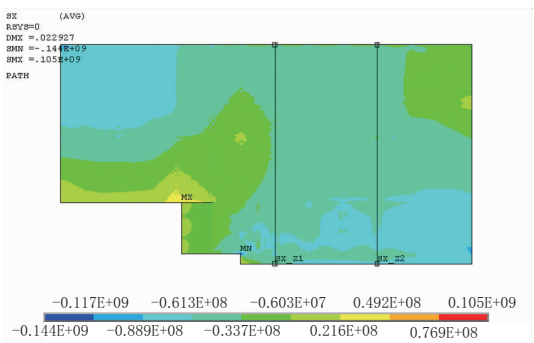


图9 顶板纵向正应力(单位:Pa)

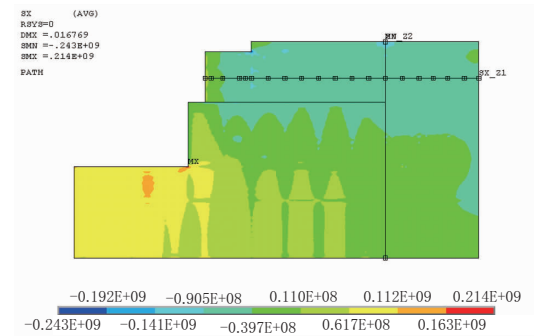


图10 底板纵向正应力(单位:Pa)

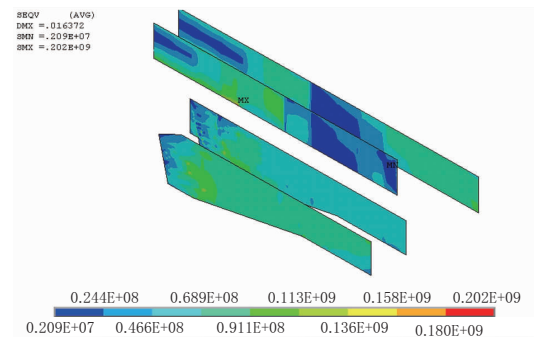


图11 锚固区腹板 Mises 应力(单位:Pa)

在成桥恒载作用下,不考虑锚体混凝土的效应后,主缆钢结构锚固区主要板件应力结果见表2,其中顶、底板为是纵向应力(主要受力方向),腹板与锚体中加劲为 Mises 应力。

根据表2分析可得:不考虑锚体的混凝土效应,顶、底板与腹板的应力变化较小,但锚体加劲的应力变化较大, Mises 应力由148 MPa增加至189 MPa,

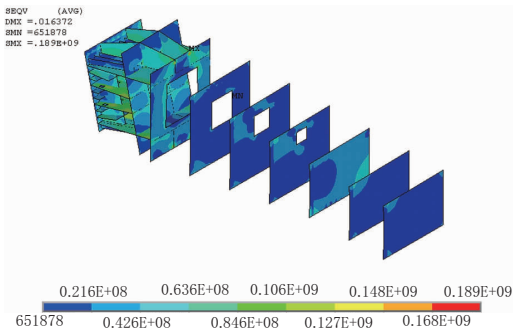


图 12 锚固区加劲板 Mises 应力(单位:Pa)

表 2 主缆锚固区主要板件应力对比 单位:MPa

板件	考虑锚体混凝土	不考虑锚体混凝土
顶板	-83/48	-88/49
底板	-94/60	-88/62
腹板	126	133
加劲	148	189

可见混凝土对加劲应力的减小起到了较大的作用。

3 结 语

主缆锚固区作为自锚式协作体系桥梁结构设计的关键点之一,决定着桥梁的安全性和可靠性。本文以 60 m 航空限高条件下主跨 420 m 自锚式悬索斜拉协作体系桥梁方案为工程背景,采用有限元法

对钢结构主缆锚固区的空间受力情况进行了研究,主要结论如下。

(1)计算分析表明,在主缆拉力和结构成桥恒载作用下,除个别应力集中点外,主缆锚固区的纵向应力、Mises 应力均满足要求,具备了一定的结构安全储备。

(2)不考虑锚体的混凝土效应,顶、底板与腹板的应力变化较小,但锚体加劲的应力变化较大,混凝土对锚体加劲板应力的减小起到了较大的作用。

参考文献:

- [1] 肖汝诚,项海帆.斜拉-悬吊协作体系桥力学特性及其经济性能研究[J].中国公路学报,1999,12(3):43-48.
- [2] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [3] 李中培,袁明军,刘孝武,等.自锚式斜拉-悬索协作体系桥的合理成桥状态分析[J].公路,2018,63(7):132-137.
- [4] 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,2021,38(增刊1):26-33.
- [5] 狄谨,曾奎,涂熙,等.鹅公岩轨道专用桥主缆锚固区模型试验研究[J].桥梁建设,2018,48(6):58-63.
- [6] 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,2020,50(增刊2):209-215.
- [7] 王宏博,陈国红.桃花峪黄河大桥主缆锚固段设计与受力分析[J].桥梁建设,2013,43(6):100-105.

(上接第 64 页)

市高架桥梁的技术瓶颈,解决了立交桥梁预制装配难题。项目于 2021 年 6 月实质开工,2022 年 11 月西二环已建成通车。除跨铁路段外,其余路段预计于 2023 年底具备通车条件。

参考文献:

- [1] 周华保,焦守法,高原,等.淄博市快速通道系统构建研究[J].城市道桥与防洪,2022(4):22-26.
- [2] 周华保,焦守法,张帅帅,等.淄博市一环快速路总体方案研究[J].城市道桥与防洪,2022(2):24-28.

- [3] 山东明嘉勘察测绘有限公司,山东省交通规划设计院集团有限公司.淄博市城市快速路网建设一期工程岩土工程勘察报告(详细勘察阶段)[R].淄博:山东明嘉勘察测绘有限公司,2021.
- [4] 山东明嘉勘察测绘有限公司.淄博市快速路一期建设工程采空区勘察报告[R].淄博:山东明嘉勘察测绘有限公司,2021.
- [5] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范(2019 年版)[S].
- [6] 张泉.淄博一环快速路昌国路—鲁山大道立交桥总体设计[J].城市道桥与防洪,2022(6):79-83.
- [7] JTG/T D31—03—2011,采空区公路设计与施工技术细则[S].