

斜拉悬索协作体系桥梁塔-基钢混结合段受力分析

王冲, 高进进

(陕西省交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了解斜拉-悬索协作体系桥梁塔-基钢混结合段受力情况,根据某实际工程,利用 ANSYS 软件建立塔-基钢混结合段的三维实体有限元模型,分析计算其在最不利荷载工况下的力学特性。结果表明:运营阶段的作用效应组合工况为塔-基钢混结合段受力最不利荷载工况;塔-基钢混结合段的钢箱部分受力呈近承台面应力水平低、近结合段上分界面应力水平高的分布规律,钢箱部分最大 Mises 应力小于材料屈服强度;主桥塔钢箱内填混凝土在钢混结合段上分界面处及与承台顶面交界面因尺寸突变均出现小范围点状拉应力集中,峰值达 8.5 MPa;最大主压应力为 16.8 MPa,均小于规范限值。在不考虑极少位置应力集中开裂的情况下,塔-基钢混结合段受力安全。

关键词: 斜拉-悬索协作体系;钢混结合段;受力分析;应力集中

中图分类号: U441+.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)08-0262-04

0 引言

斜拉-悬索协作体系桥梁结构新颖,造型美观,备受有景观要求的城市桥梁青睐^[1-3]。但该类桥梁从结构受力层面而言极为复杂,使得其在广泛应用时具有一定挑战。因此,学者们从不同研究角度对斜拉-悬索协作体系桥梁开展分析。文献[4]分析了矢跨比、吊跨比、交叉索数量等结构参数对背景斜拉-悬索组合体系桥梁结构静力特性影响。文献[5]分析了主缆及斜拉索刚度、矢跨比和斜跨比等结构参数对常洪大桥的动力特性影响。文献[6]利用无应力索长对应的索力不变原理研究斜拉-悬索组合体系桥梁缆索系统(斜拉索和吊杆)的成桥索力计算方法。文献[7]依托实际工程,将缆索系统索力均匀分布、塔梁弯矩设为控制目标,提出斜拉-悬索组合体系桥梁缆索系统索力优化方法。文献[8]通过对某斜拉-悬索组合体系桥梁施工阶段塔梁临时连接反力箱附近塔壁进行受力分析,结果表明该临时固结构造受力符合规范强度要求。文献[9]利用 Midas FEA 软件分析了鹅公岩轨道专用桥施工过程中临时钢扣塔和主桥塔固结部位的受力情况。综上所述,目前研究者大多关注斜拉-悬索协作体系桥梁整体结构设计参数分析、静动力学特性及索力优化,对斜拉-悬索组合体系桥梁细部构件分析较少,且以施工过程中的临时部件为主。

本文以某自锚式斜拉-悬索组合体系桥梁结构为工程实例,关注钢桥塔与承台基础连接部位的塔-基钢混结合段的受力情况,利用 ANSYS 软件建立该部位的实体有限元模型,分析其在最不利荷载工况下的应力分布情况,以期同类桥梁细部分析提供参考。

1 工程概况

依托工程为自锚式斜拉-悬索协作体系桥梁(跨径布置为 75 m+228 m+75 m),桥宽 41.6 m(含风嘴),中跨主梁采用 PK 断面钢箱梁[见图 1(c)],边跨主梁采用同形状混凝土箱梁,结构体系采用半漂浮体系,整个悬索系统设置在中跨,整个斜拉系统设置在两边跨。采用“先缆后梁”的吊装施工方法进行施工。依托桥梁工程跨径布置如图 1(a)所示。主缆为矢跨比 1/7(矢高 44.5 m)的空间曲线索形。主塔采用 Q420D 和 Q345D 钢材,外形按“悬链线+直线”的拱轴线设计(高 71.474 m,宽 38.86 m),桥塔向边跨侧倾斜 20°。次塔根据构造和美观需求设计,与主桥塔夹角为 65°[见图 1(b)],且不参与结构受力。主桥塔与承台通过塔-基钢混结合段(钢箱内填充 C50 混凝土)连接,以保证将钢桥塔所承受的内力顺畅传递至混凝土基础中。塔-基钢混结合段典型断面如图 1(d)所示,其中 L_0 在预埋段深度内宽度由小变大。

2 有限元模型及主要材料参数

2.1 塔-基钢混结合段有限元模型

采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 建立塔-

收稿日期: 2022-08-12

作者简介: 王冲(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

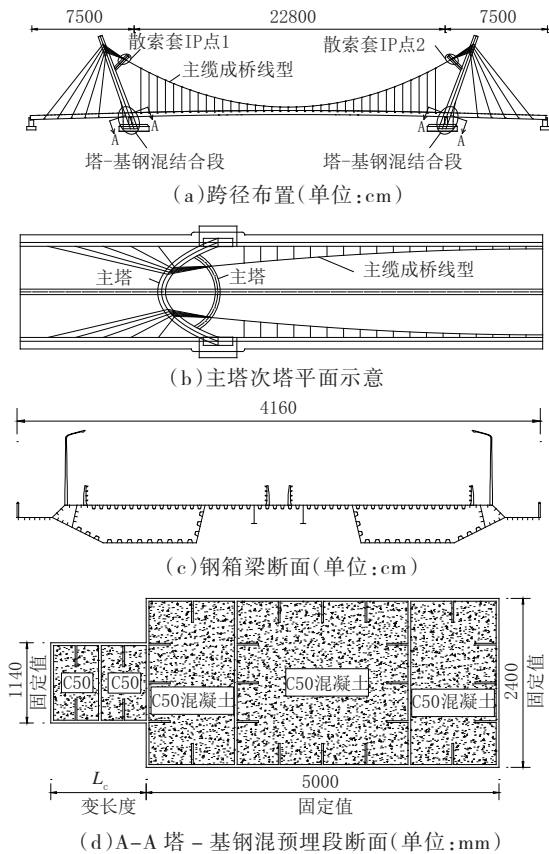


图 1 依托工程结构示意图

基钢混结合段实体模型。其中,主桥塔钢箱部分采用 4 节点 6 自由度的 SHELL63 板壳单元(整个模型共 7 432 个单元),钢箱内填充混凝土和承台采用 8 节点 6 面体的 SOLID185 三维实体单元(整个模型共 73 654 个单元),钢箱板壳单元与混凝土实体单元共节点耦合。约束条件将承台底部设为全部固结(即有限元模型中承台底下表明约束其所有自由度)。塔-基钢混结合段实体模型的建立过程如图 2 所示。

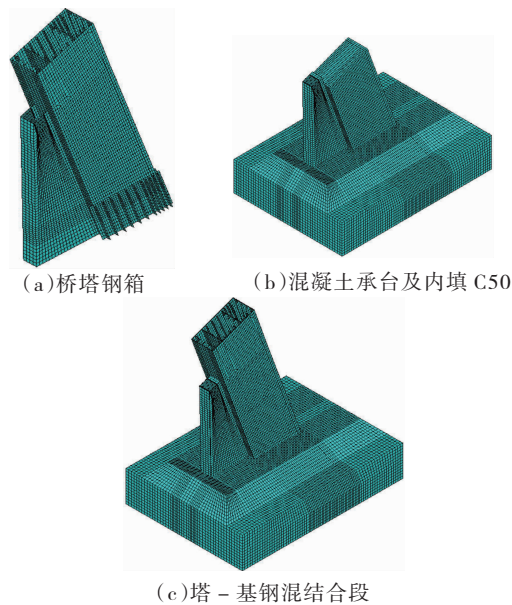


图 2 塔-基钢混结合段有限元模型建立过程示意(ANSYS)

2.2 主要材料参数

主桥塔钢箱壁板采用 Q420D 钢材,钢箱内加劲板采用 Q345D 钢材,钢箱内填充的混凝土采用 C50 型号,承台混凝土采用 C30 型号。塔-基钢混结合段的主要材料力学性能指标见表 1。

表 1 塔-基钢混结合段主要材料力学性能指标

材料项目	钢箱内填充混凝土	主桥塔钢箱壁板	钢箱内加劲板	承台混凝土
	C50	Q420D	Q345D	C30
弹性模量 /MPa	3.45×10^4	2.1×10^5	2.1×10^5	3.55×10^4
泊松比	0.2	0.3	0.3	0.2
屈服应力 /MPa	—	420	345	—
轴心抗压 / 抗拉强度 标准值 /MPa	32.4/2.64	—	—	20.1/2.01
线膨胀系数 / $^{\circ}\text{C}^{-1}$	1.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.2×10^{-5}

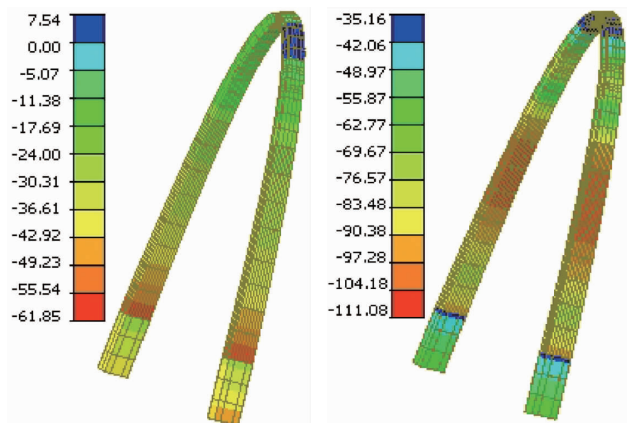
3 塔-基钢混结合段受力分析

3.1 最不利荷载工况分析

塔-基钢混结合段受力分析前,首先利用 Midas Civil 软件建立依托工程整桥结构进行受力分析,以期获取塔-基钢混结合段最不利受力荷载工况。分析计算过程非本文关注内容,因此这里仅给出桥塔结构在不同施工阶段、不同荷载工况下的受力分析结果,不再赘述计算过程。桥塔在施工裸塔阶段、成桥状态和运营阶段的应力分布如图 3 所示。施工裸塔阶段荷载工况为自重+施工横风,成桥状态荷载工况为一期恒载+二期恒载,运营阶段荷载工况为恒载(一、二期)+基础变位+汽车荷载+人群荷载+风载+整体降温+日照负温差。由图 4 可知,运营阶段荷载工况下,塔-基钢混结合段与桥塔钢箱分界面附近压应力最大,约为 133.18 MPa。因此,本文计算分析选取运营阶段荷载工况作为后续分析的最不利荷载工况,将该荷载工况下整体结构模型中塔-基钢混结合段分界面位置处的内力作为有限元实体模型的荷载边界条件。

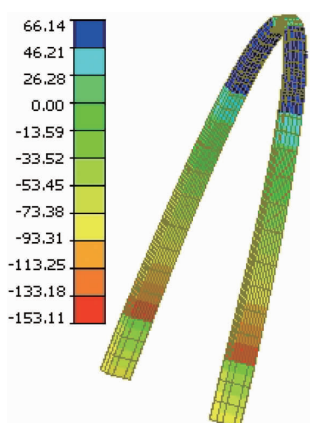
3.2 主桥塔钢箱部分受力分析

利用 ANSYS 强大的分析能力,计算得到最不利荷载工况下塔-基钢混结合段的主桥塔钢箱部分应力分布情况,如图 4(a)所示。这里为了突出主桥塔钢箱部分应力较大的位置,将应力小于 100 MPa 的位置做灰化处理,得到主桥塔钢箱部分应力超过 100 MPa 的区域如图 4(b)所示。由图 4(a)可知,在最不利荷载工况下,主桥塔钢箱大部分位置应力水平较低,



(a)施工裸塔阶段

(b)成桥状态



(c)运营阶段

图3 桥塔在不同施工阶段不同荷载工况下的应力分布(单位:MPa)

Mises 应力小于 17.1 MPa, 总体呈现近承台面应力水平低、近钢混结合段上分界面应力水平高的分布规律; 最大 Mises 应力出现在内填混凝土与钢箱内塔壁相交面位置, 为 154 MPa。另外, 在承台顶面位置处也出现应力集中现象, Mises 应力约为 34.2 MPa。由图 4(b)可知, 应力超过 100 MPa 的区域出现在钢混结合段上分界面右下角位置 (即钢箱右上角), 其 Mises 应力介于 100 ~ 154 MPa, 约占主桥塔钢箱的 1/25。

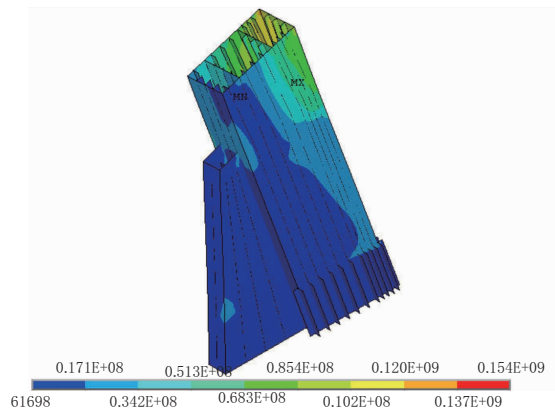
综上, 在最不利荷载工况下, 主桥塔钢箱部分最大 Mises 应力远小于钢材的屈服应力, 且大部分区域应力水平较低, 可以认为主桥塔钢箱结构受力安全。

3.3 钢箱内填混凝土及承台受力分析

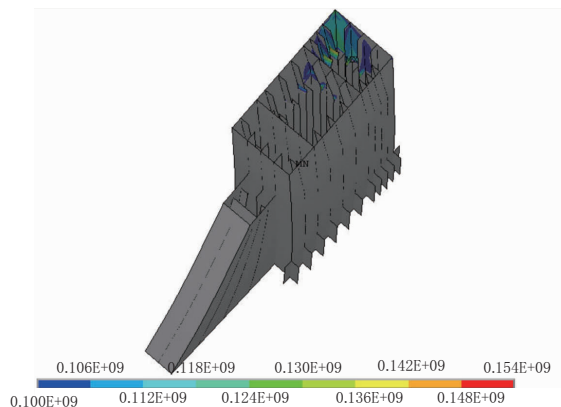
3.3.1 竖向应力分布

计算得到在最不利荷载工况下, 塔-基钢混结合段主桥塔钢箱内填混凝土及承台的竖向应力分布情况如图 5 所示。

由图 5 可知, 混凝土承台的竖向应力绝大部分介于 -2.0 (压应力) ~ 0.23 MPa (拉应力), 承台底面存在少量应力集中情况, 计算拉应力在 0.23 ~ 2.25 MPa



(a)主桥塔钢箱部分应力分布



(b)主桥塔钢箱部分应力分布超过 100 MPa 的区域

图4 主桥塔钢箱部分应力分布(Mises 应力, 单位: Pa)

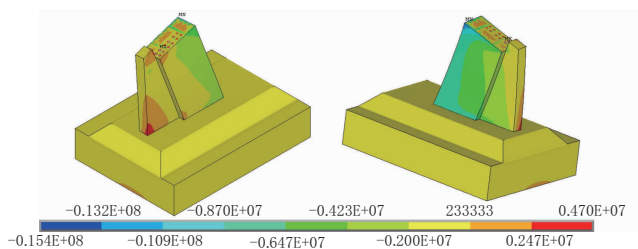


图5 钢箱内填混凝土及承台竖向应力分布(单位: Pa)

之间。主桥塔钢混结合段上分界面出现小范围点状应力集中, 最大拉应力约为 4.7 MPa。分析应力集中点位置及钢混结合段加劲板的构造可知, 这是由于钢箱内填混凝土与承台接触面尺寸突变所导致。钢箱附加部分和主体部分内填混凝土均与承台顶面交界处亦出现小范围点状应力集中, 计算所得其峰值分别为 4.7 MPa 和 1.25 MPa。根据图 5 的应力分布情况, 最大压应力出现在主桥塔钢混结合段上分界面棱角处, 亦为应力集中, 最大压应力为 15.4 MPa。

综上, 无论是钢箱内填混凝土还是承台, 最大压应力均小于其规范限值^[10]。对于极少的应力集中部位, 在不考虑混凝土开裂情况下, 整个塔-基钢混结合段混凝土部分受力亦处于安全状态。

3.3.2 主拉应力分布

计算得到在最不利荷载工况下, 塔-基钢混结

合段主桥塔钢箱内填混凝土及承台的主拉和主压应力分布情况如图6所示。其中,图6(a)为主拉应力分布情况,图6(b)为主拉应力超过2 MPa以上的区域,图6(c)为主压应力分布情况。

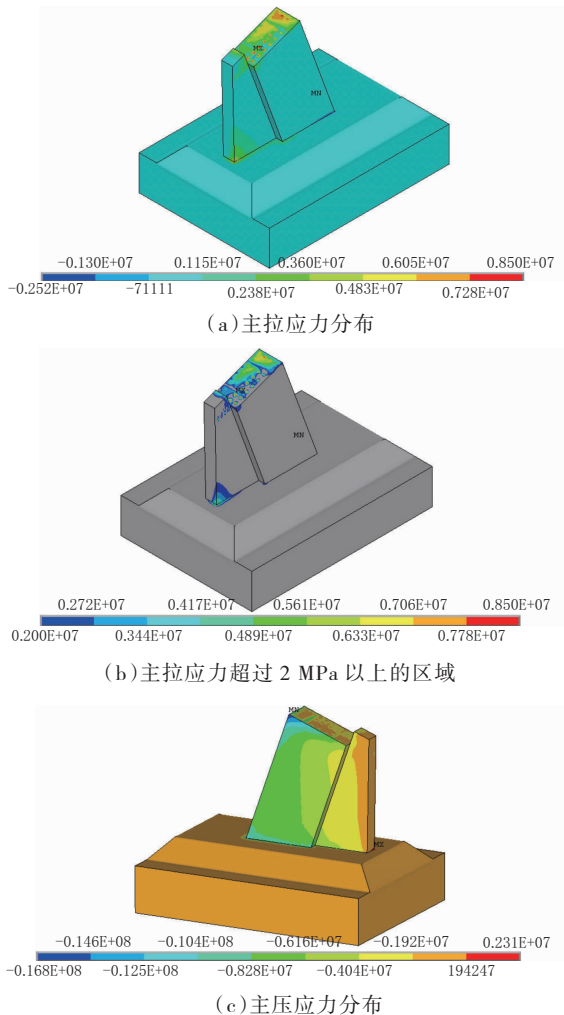


图6 钢箱内填混凝土及承台主拉和主压应力分布(单位:Pa)

由图6可知,混凝土承台的主拉应力介于0.07~1.15 MPa,主压应力约为0.87 MPa,均处于较低应力水平。根据图6(a),主桥塔钢混结合段分界面亦出现小范围点状应力集中分布,峰值达8.5 MPa(对于混凝土,不考虑极少位置应力集中部位开裂情况)。这种情况与3.3.1节中所述原因一致。钢箱附加部分和主体部分内填混凝土均与承台顶面交界处亦出现应力集中,计算所得其最大主拉应力分别为7.89 MPa和2.0 MPa。根据图6(b),钢箱附加部分和主体部分内填混凝土有较大范围的主拉应力超过2.0 MPa,主要集中在附加部分与承台接触面和钢混结合段上分界面。在最不利荷载工况下,钢箱内填混凝土最大主压应力亦出现在主桥塔钢混结合段上分

界面棱角处,为16.8 MPa。因此,在不考虑极少位置应力集中开裂的情况下,从主拉、主压应力层面而言,整个塔-基钢混结合段混凝土部分受力安全。

4 结 语

本文依托某斜拉-悬索协作体系桥梁,利用ANSYS软件分析结构塔-基钢混结合段在最不利荷载工况下的受力情况,得到以下结论:

(1)运营阶段的作用效应组合工况下,塔-基钢混结合段受力最为不利,可将该工况作为最不利荷载工况。

(2)塔-基钢混结合段的钢箱部分受力呈近承台面应力水平低、近结合段上分界面应力水平高的分布规律,钢箱最大Mises应力小于材料屈服强度,受力安全。

(3)主桥塔钢箱内填混凝土在钢混结合段上分界面处及与承台顶面交界面因尺寸突变均出现小范围点状拉应力集中,峰值达8.5 MPa,最大主压应力为16.8 MPa,均小于规范限值。在不考虑极少位置应力集中开裂的情况下,钢混结合段混凝土部分受力安全。

参考文献:

- [1] 任宏业,任国红,王青桥.自锚式悬索-斜拉协作体系设计与景观[J].城市道桥与防洪,2011(5):56-60.
- [2] 高小妮,齐宏学,路文琴,等.斜拉-自锚式悬索组合体系桥梁发展及研究现状[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(12):341-344.
- [3] 张哲,王会利,黄才良,等.自锚式斜拉-悬索协作体系桥梁设计与分析[J].公路,2006(7):44-48.
- [4] 肖海珠,高宗余,何东升,等.公铁两用斜拉-悬索协作体系桥结构参数研究[J].桥梁建设,2020,50(4):17-22.
- [5] 张文静,顾民杰,王青桥.自锚式斜拉-悬索协作体系桥的动力特性研究[J].低温建筑技术,2020,42(4):58-61.
- [6] 张哲,朱巍志,潘盛山,等.基于几何非线性的自锚式斜拉-悬索协作体系桥成桥索力计算[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2009,25(5):822-828.
- [7] 曹均旺.自锚式悬索-斜拉组合结构体系桥梁索力优化方法研究[D].西安:长安大学,2008.
- [8] 王成树,严伟飞,余茂峰.东苕溪大桥斜拉-悬索组合体系施工关键技术研究[J].公路交通技术,2011(5):78-81.
- [9] 王丹阳.自锚式悬索桥“先斜拉后悬索”体系转换过程受力性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [10] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].