

# 异形拱塔斜拉桥桥塔结合部受力研究

董宇航<sup>1</sup>, 张谢东<sup>1</sup>, 郭子会<sup>2</sup>, 姚璐<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063; 2. 内蒙古伊泰准东铁路有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

**摘要:** 单墩多塔多索面异形拱塔斜拉桥的主、副拱塔结合部受到多个方向作用力作用, 受力相当复杂。为掌握该桥型结构复杂区域的受力情况, 文中基于子模型法, 采用有限元软件 MIDAS/Civil、ABAQUS 分别建立桥梁整体和拱塔结合部局部有限元模型, 对不同工况下拱塔结合部受力进行计算分析。结果表明, 拱塔结合部整体受力安全, 但局部出现应力集中现象。

**关键词:** 桥梁; 斜拉桥; 拱塔结合部; 受力分析

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0088-04

单墩多塔多索面异形拱塔斜拉桥的拱塔结合部承受所有桥梁上部荷载并均匀传递到桥墩重要受力构造部位, 其受到来自主、副塔 3 个方向的轴力、弯矩、剪力和扭矩的共同作用, 受力相当复杂。拱塔结合部上连接 2 个外倾边主塔和 1 个竖直中副塔, 其两侧主塔相对竖直副塔成  $32^\circ$  倾角, 下部嵌入砼桥墩中, 将主塔桥梁上部结构荷载均匀传递到桥墩, 桥塔、拉索与主梁形成整体。当主梁上仅作用恒载时, 由于成桥状态的确定, 主塔及副塔根部的内力相对较小且对称分布, 相应的拱塔结合部应力分布较明确。当主梁上作用活载时, 拉索和主塔的受力状态会发生改变, 直接影响拱塔结合部上截面的内力, 拱塔结合部受力不再对称, 其应力分布形式不明确。对于拱塔结合部在各工况下应力状态的分析, 采用三维有限元实体模型模拟计算比杆系模型更精确, 而全桥实体模型的建立需较多单元数和节点数, 建模和计算过程都较费时。应用基于圣维南原理的子模型法分析局部应力可减少建模工作量, 节约时间, 提高局部模型计算精度。其思想是在整体模型计算结果下建立局部分析模型, 整体模型为局部模型提供相应的边界条件和外荷载, 最后对局部模型进行计算分析。该文以某  $2 \times 90$  m 单墩多塔多索面斜拉桥为例, 利用 MIDAS/Civil、ABAQUS 有限元软件分别建立整体杆系模型和拱塔结合部实体模型, 采用整体模型计算分析结果, 结合子模型法分析拱塔结合部的受力。

## 1 分析理论

拱塔结合部切口截面为带加劲肋板的钢箱梁截面形式, 其局部单元坐标系受力见图 1。

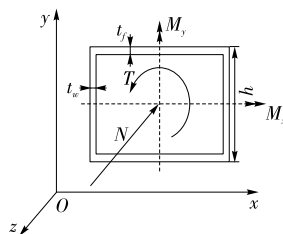


图 1 箱形截面受力作用示意图

对于单个钢箱梁截面, 考虑到钢箱梁的壁厚 ( $t = 40$  mm) 与宽度 ( $d = 2\,000$  mm) 的比值为  $0.02 < 0.1$ , 若忽略加劲肋版的作用而进行偏安全的强度验算, 则可将钢箱看成一闭口薄壁矩形截面杆。按照 GB 50017-2014《钢结构设计规范》, 对于压弯构件, 其抗弯强度按下式计算:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \quad (1)$$

式中:  $N$  为轴压力;  $A_n$  为截面面积;  $M_x$ 、 $M_y$  分别为对截面主轴  $x$ 、 $y$  的弯矩;  $W_{nx}$ 、 $W_{ny}$  分别为对截面主轴  $x$ 、 $y$  的净截面抵抗矩;  $\gamma_x$ 、 $\gamma_y$  为截面塑性发展系数, 对于箱形截面, 其值为 1.05。

参考文献[4]~[6], 作下述假定: 刚周边假定; 理想弹塑性材料; 材料屈服服从 Mises 准则; 截面达到全塑性时, 正应力与剪应力均为矩形分布。忽略大变形与应变硬化, 结合 ANSYS 计算分析与试验研究, 弯扭承载力设计需满足下式:

$$\left(\frac{M}{M_p}\right)^2 \pm \left(\frac{T}{T_p}\right)^2 \leq 1 \quad (2)$$

式中:  $M_p$ 、 $T_p$  分别为截面全塑性弯矩和扭矩。

根据上述公式可求得单钢箱的压弯扭承载极限。实际工程中拱塔结合部承受 3 个方向的压弯扭联合作用, 其受力状态远比单钢箱复杂, 需建立三维

实体模型进行数值计算分析。

## 2 工程概况

某  $2 \times 90$  m 单墩多塔多索面斜拉桥的立面布置见图 2。

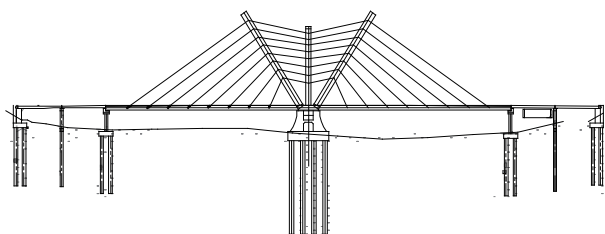


图 2 桥梁立面布置示意图

## 3 有限元计算模型

### 3.1 MIDAS 计算模型的建立

运用 MIDAS/Civil 建立该桥空间结构计算模型(见图 3),将全桥结构离散为 232 个节点、246 个单元,其中桁架单元 64 个、梁单元 182 个。主梁、桥塔、桥墩及拱塔结合部均采用梁单元模拟,斜拉索采用桁架单元模拟。考虑恒载和活载的作用,其中:恒载分为一期恒载和二期恒载,一期恒载主要为主梁、主塔、拉索和桥墩自重,二期恒载为桥面铺装层、人行道板、栏杆和绿化带的重量;活载分为汽车荷载和人群荷载,汽车荷载采用城-A 级,双向四车道,人群荷载采用  $4 \text{ kN/m}^2$ 。温度荷载采用升温  $45^\circ\text{C}$  和降温  $-30^\circ\text{C}$ ,主梁温度梯度按规范取值。基础不均匀沉降按主塔处沉降 2 cm、两侧桥台沉降 1 cm 考虑。风荷载考虑横向风载和顺向风载。

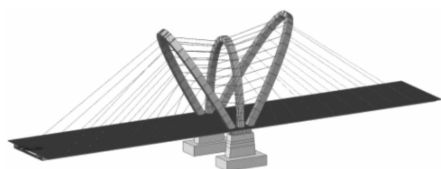


图 3 全桥结构有限元模型

### 3.2 ABAQUS 计算模型的建立

主、副拱塔三塔结合部的结构形式见图 4。结构上部有 3 个切口,分别为主、副塔起点截面,3 个截面的内力可通过 MIDAS/Civil 采用空间杆系结构计算得到。利用 ABAQUS 建立空间实体单元模型,拱塔结合部采用八节点六面体线性减缩积分单元 C3D8R 进行结构离散。虽然拱塔结合部为对称结构,由于荷载不对称,建立拱塔结合部全尺寸模型。分析模型的坐标以纵桥向轴线为  $x$  轴、横桥向

轴线为  $y$  轴、竖直向上的方向为  $z$  轴, $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴满足右手螺旋法则。

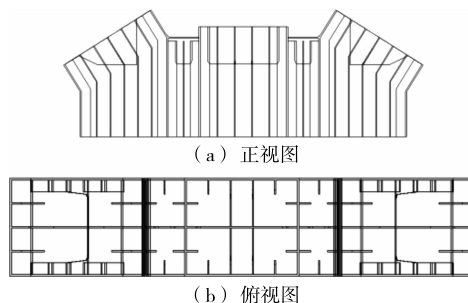


图 4 拱塔结合部的结构形式

由于拱塔结合部内部加劲肋板较多,对实体模型进行网格划分时采用扫略和结构划分技术相结合的方法,结构加载部位附近和截面突变的地方采用结构网格划分使形成的网格较规整,结合部底部离加载截面较远的部位采用扫略的形式以提高网格划分效率,节省建模时间。划分网格后的有限单元模型见图 5。

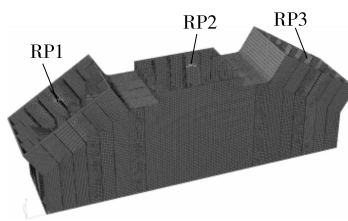


图 5 拱塔结合部网格划分

在模型中施加荷载和边界,拱塔结合部的下端采用全固结,约束所有方向的位移和转角,上部 3 个端面自由。为模拟主、副塔向拱塔结合部传递的实际内力,上部 3 个截面形心处分别建立 3 个参考点 RP1、RP2 和 RP3,通过将 3 个参考点与截面进行耦合约束,原本需施加在截面上的内力可等效在 3 个参考点上施加,减小荷载施加模拟难度。

## 4 成桥状态静力计算结果分析

### 4.1 整体模型计算结果

应用 MIDAS/Civil 对该桥进行整体模型计算,通过影响线加载分析得:主塔起点截面轴力最大时为汽车荷载满载工况,主塔起点截面弯矩最大时为汽车荷载半载工况。为了解拱塔局部应力情况,结合温度荷载和风荷载的影响,主要从汽车荷载满载工况和汽车荷载半载工况进行分析,求得两工况作用下主、副塔根部截面的内力。在整体模型计算时,内力方向为单元坐标轴方向,且计算的剪力相对轴

力可忽略不计,故仅将轴力、弯矩及扭矩换算成整体 坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的力和弯矩(见表 1、表 2)。

表 1 汽车荷载全载工况作用下拱塔结合部切口截面内力

位置	参考点力/kN			参考点弯矩/(kN·m)		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
东侧主塔	12 778	-1 973	-21 219	-11 473	3 398	171
西侧主塔	-12 947	-1 960	-20 661	-11 458	-3 044	-145
中间副塔	389	1 128	8 426	7 948	-8 203	-113

表 2 汽车荷载半载工况作用下拱塔结合部切口截面内力

位置	参考点力/kN			参考点弯矩/(kN·m)		
	$x$	$y$	$z$	$x$	$y$	$z$
东侧主塔	12 472	-1 942	-24 511	-11 253	6 217	186
西侧主塔	-12 848	-1 914	-19 828	-11 242	-8 203	-113
中间副塔	-505	1 107	8 228	7 843	-5 626	120

在该桥上下游有 2 个拱塔结合部,根据受力对称性,取下游拱塔结合部作为研究对象。为区分拱塔结合部东西侧主塔切口截面位置,以 1# 表示西侧主塔切口截面、2# 表示副塔切口截面、3# 表示东侧主塔切口截面(见图 6)。

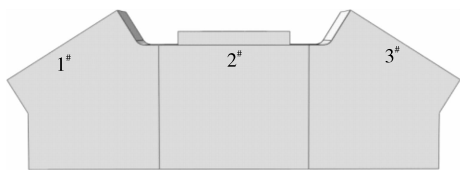


图 6 切口编号示意图

#### 4.2 汽车荷载全载工况分析

将汽车荷载全载作用下整体模型计算所得内力施加于子模型参考点上,通过计算得到 Mises 应力云图。由于拱塔结合部为对称三维实体,作用在其上的荷载为非对称荷载,其应力云图不能仅看某一个面,需从实体各单元来分析。如图 7 所示,提取拱塔结合部正视图、后视图及俯视图进行分析。

从图 7(a)可看出:拱塔结合部外侧(人行道侧)除截面突变处局部单元应力稍大外,整体应力相对较小且基本对称分布。

从图 7(b)可看出:1#、3# 切口截面处的应力相对较大,在截面突变处达到最大值。

结合图 7(a)、(b)可以看出:在汽车荷载全载工况下,拱塔结合部内侧受力比外侧受力大,最大主应力出现在 1#、3# 切口截面内侧(行车道侧)下部的截面突变处,为 319MPa。拱塔结合部所用钢材为

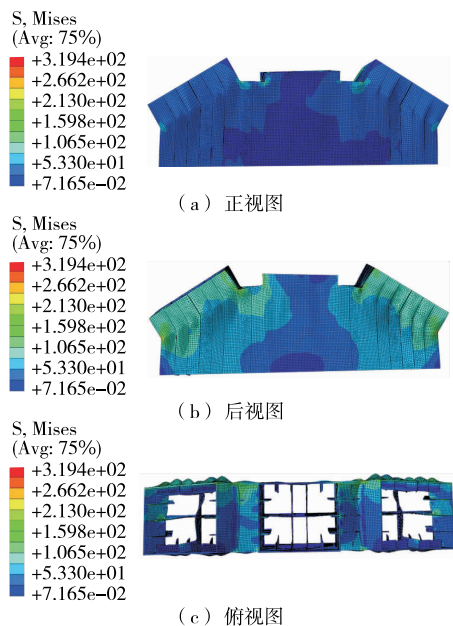


图 7 汽车荷载全载工况下拱塔结合部应力云图(单位:MPa)

Q345qD,其屈服强度为 345 MPa,拱塔结合部受力未达到屈服状态。2# 切口截面下部以近似  $45^\circ$  方向延伸到底部的梯形区域应力最小。分析其原因,应力最大的单元部位是弯矩应力和轴力应力同向作用点,且该处截面是由小变大的分界线,故出现应力集中现象。

从图 7(c)可看出:在 1#、3# 切口截面下部截面突变处钢板出现向外鼓出的小变形,其内部加劲肋板也出现相应变形。分析其原因,由于截面内力的

作用,箱梁内部加劲肋板出现变形,且影响到外部钢板,使钢板发生鼓包现象。

### 4.3 汽车荷载半载工况分析

将汽车荷载半载作用下整体模型计算所得内力施加于子模型参考点上,通过计算得其 Mises 应力云图(见图 8)。

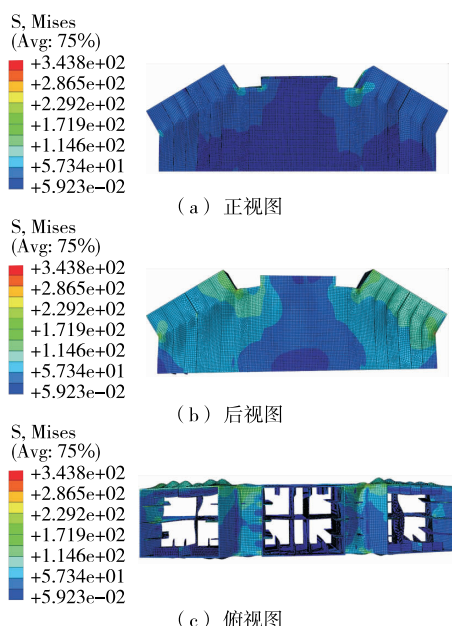


图 8 汽车荷载半载工况下拱塔结合部应力云图(单位:MPa)

从图 8(a)可看出:拱塔结合部外侧受力相对较小,较大应力主要发生在 1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 切口截面下部截面突变处角点上,但应力值不大;拱塔结合部外侧钢板的整体应力较小。

从图 8(b)可看出:1<sup>#</sup> 切口截面下部受力比 3<sup>#</sup> 切口截面下部大,2<sup>#</sup> 切口截面以下区域受力较小。

结合图 8(a)、(b)可看出:在汽车荷载半载作用

下,内侧钢板受力比外侧钢板受力大,最大应力出现在 1<sup>#</sup> 切口截面下部截面突变角点上,为 343 MPa。钢材的屈服强度为 345 MPa,最大应力接近于屈服强度值。除几个角点的应力相对较大外,拱塔结合部整体应力都较低。

从图 8(c)可看出:1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 切口截面下部截面突变处钢板产生外鼓变形,焊接于钢板之上的内部加劲肋板也出现变形现象,且 1<sup>#</sup> 位置变形比 3<sup>#</sup> 位置更突出。

## 5 结论

(1) 拱塔结合部最不利荷载工况为汽车荷载半载工况,加载桥跨边主塔根部切口截面下部截面突变处角点位置应力最大。

(2) 在满载工况和半载工况荷载作用下,拱塔结合部的整体应力水平较低,但局部应力集中现象较严重。

(3) 应力集中发生在切口下部截面突变处角点上,可通过优化该部位构造形式减小应力集中现象。拱塔结合部内侧钢板受力比外侧钢板大,可优化内、外侧钢板厚度使整体受力更均匀。

## 参考文献:

- [1] JTG D65—01—2007,公路斜拉桥设计细则[S].
- [2] 孙文会,曹玉贵,压劲松,等.基于子模型法的独塔斜拉桥索塔局部受力分析[J].土木工程与管理学报,2014,31(3).
- [3] GB 50017—2014,钢结构设计规范[S].
- [4] 孙仕,张谢东,吕利芹,等.地锚式斜拉桥无轴力铰受力性能分析[J].公路与汽运,2018(2).

收稿日期:2018—05—04

(上接第 78 页)

速上升,喷洒预湿水可显著增大混合料中含水量,通过蒸发吸热过程带动降低地表温度,从而减少破乳时间。4) 为降低混合料在摊展箱中所占的体积比例,采用减少摊铺车中混合料输出量及加快摊展速度的方式,确保搅拌器处于最佳工作状态。

## 5 结语

微表处具有很多优点,其运用在中国尚属起步阶段,施工中常出现各种各样的质量问题,如何正确、及时地处理这些问题,使该技术在高速公路上得

到更广泛应用,取得最大的经济与环境效益,是目前亟待深入研究的课题。

## 参考文献:

- [1] 李小重.微表处在叶信高速公路路面养护中的应用[J].中外公路,2017,37(3).
- [2] 任斌.微表处施工的配合比设计及质量控制[J].民营科技,2016(9).
- [3] 李喆.微表处技术在高速公路沥青路面养护施工中的应用[D].济南:山东大学,2013.

收稿日期:2018—06—13