

考虑分丝管模拟的底部分叉形矮塔 斜拉桥索塔应力分析

莫利君¹, 陈华²

(1.湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051; 2.湖北交投十巫高速公路有限公司)

摘要: 针对某主跨(90+165+90)m矮塔斜拉桥混凝土分叉形索塔,采用大型通用有限元软件,用实体单元模拟塔柱锚固区的钢索鞍分丝管,分丝管内的拉索钢丝不模拟,索力采用垂直于分丝管索鞍的法向面力进行模拟,分析塔柱索鞍区及塔柱分叉区的混凝土应力。计算表明:索塔分丝管索鞍区的应力能满足要求,但塔柱分叉区存在局部超限应力区域。根据计算结果及矮塔斜拉桥分叉形塔柱的构造特点,提出改善塔柱分叉区局部受力的设计思路。

关键词: 矮塔斜拉桥; 索塔应力; 分丝管模拟

1 前言

矮塔斜拉桥最早是由法国 M.Jacques 于 1988 年提出的。在中国,矮塔斜拉桥虽然出现较晚,但因为施工方便、刚度大、抗震性能良好等优点,得到了快速发展。目前,矮塔斜拉桥索塔锚固区构造多为分丝管结构,它由集束钢管组焊而成,钢绞线对应穿过每束钢管,具有避免应力集中、易换索等优点。

国内外学者针对矮塔斜拉桥混凝土索塔的应力进行了大量的模型试验和理论分析,针对分丝管索鞍也进行了一些研究。刘尊稳等对某矮塔斜拉桥索塔锚固区进行的节段模型试验及有限元分析表明:索塔锚固区分丝管索鞍下方混凝土的横向劈裂应力、竖向压应力呈抛物线形分布;索鞍下方混凝土应力分布比较均匀,结构处于弹性状态;索鞍下方混凝土易被拉裂;莫恺筠对实桥主塔有索区的实测应力数据进行对比分析表明:有索区底部所受的压应力都是最大的;孔道荷载面附近区域应力较大,但随着离开孔道面距离的增大而急剧减小,孔道侧面会出现竖向拉应力;分丝管结构应力分布较为均匀,能有效改善下部混凝土的应力集中现象。

分丝管与索鞍接触处的应力分布较为复杂,目前所采用的计算方法主要有等效荷载和接触分析两类,且两类方法均将分丝管中的钢束等效为一束进行分

析,模型中分丝管与索鞍接触处的尺寸与实际结构尺寸不一致。尤其对于底部存在局部掏空的分叉形塔柱,分叉处的受力更为复杂。

该文以某主跨为 165 m 的矮塔斜拉桥为例,主桥索塔为底部中间掏空的宽 1.5 m、高 8.57 m 的圆端形底部分叉形索塔。对拉索中的每个分丝管进行模拟,模型中分丝管和索鞍的尺寸与实际相同,将钢丝在索鞍上的作用力采用垂直于索鞍分丝管的法向面力进行模拟,分析桥塔索鞍区及塔柱分叉区的应力(图 1)。

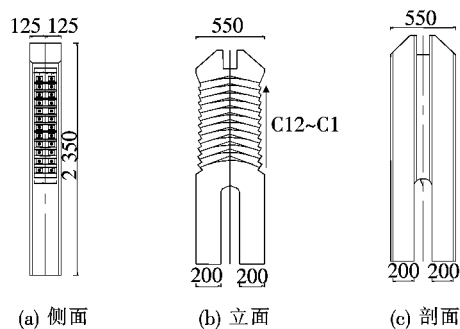


图1 主塔结构示意图(单位:cm)

2 工程概况

某桥位于镇区内,对桥梁有景观要求,桥址附近地势平坦,采用矮塔斜拉桥成为了当地的一个突出景观点,桥塔的设计结合当地的地理、人文及景观,并与当地的经济相结合,将桥塔设计为发展与绿色并举

的、寓意腾飞的、双支合并的火箭形式。

大桥主跨为(90+165+90) m 矮塔斜拉桥,主梁为单箱三室直腹板变截面箱梁,箱梁顶板宽度31.0 m,底板宽度22.0 m,根部梁高6.2 m,端部梁高3.2 m,梁高按1.8次抛物线变化。主塔桥面以上塔高23.5 m,与箱梁固结。主塔采用 C55 复合纤维混凝土,截面为带凹槽的四边形,尺寸为5.5 m(顺)×2.5 m(横),塔底8.57 m 高部分双肢分叉,单肢尺寸为2 m(顺)×2.5 m(横),塔底的双肢中间净距为1.5 m。斜拉索为单索面,扇形布置,横桥向布置在中央分隔带上,共布置两排,间距为1.0 m。斜拉索采用 37-φ^{*} 15.2 mm 钢绞线,全桥共 4×12 对拉索。拉索通过预埋在梁体内的钢护筒锚固于梁内中室隔板的齿块上。斜拉索在塔上采用分丝管式索鞍构造,分丝管采用圆弧形,弯曲半径为3.9~5.1 m。每根分丝管穿一根钢绞线。在两侧斜拉索出口处设抗滑锚固装置,以防止钢绞线的滑动。

3 有限元模型建立

首先采用 Midas/Civil 建立整体杆系模型,从整体模型中提取最不利工况下的索力和塔底的作用力,再采用 Ansys 建立索塔局部模型。

局部模型的坐标系方向为:*x* 为索塔长度方向,向左为正,*y* 为索塔高度方向,向上为正,*z* 为索塔厚度方向,向内为正。钢索鞍采用 Solid45 单元,将每个分丝管用实体单元进行表示,并将材料特性定义为钢材,不考

虑分丝管中的空洞,索塔混凝土采用 Solid45 单元。

由于对索鞍分丝管考虑得较精细,故而单元模型较多,完全建立索塔模型变得较为困难,故而选取索塔最下部两对拉索即 C1、C2 拉索(图 1)及其下索塔部位进行建模分析。模型中钢索鞍内的钢丝不模拟,钢丝在索鞍上的作用力采用垂直于索鞍分丝管的法向面力进行模拟,通过索鞍分丝管表面的生成面单元,并将法向面力施加在该面单元上。面力的大小可采用式(1)进行计算,C1、C2 拉索索鞍对应的索鞍分丝管表面法向等效力计算结果见表 1。

$$q_x = \frac{F_s}{R} \tag{1}$$

式中:*F_s* 为索力;*R* 为索鞍半径;*q_x* 为法向等效力。

表 1 C1、C2 拉索索鞍对应的索鞍分丝管表面法向等效力

拉索位置	索力大小/kN	索鞍半径 <i>R</i> /m	等效力大小 <i>q_x</i> /(kN·m ⁻¹)	等效面荷载 <i>q_m</i> /(kN·m ⁻²)
C1 索鞍分丝管表面	4 170	3.9	1 069.2	1 204.1
C2 索鞍分丝管表面	4 237	4.0	1 059.3	1 193.0

以上分析索塔部位采用索塔自重与斜拉索垂直分力等效模拟,通过面力加载在有限元模型上,具体计算数值见表 2。由于划分的单元较多,采用 1/4 模型进行计算,在对称面施加对称约束。

表 2 加载在索鞍有限元模型上表面的拉索垂直等效力

索编号	索水平倾角 <i>θ</i> /(°)	sin <i>θ</i>	拉索索力/kN	单侧拉索索力垂直分力/kN	拉索索力水平分力/kN
C3	22.7	0.385 906	4 272	1 649	3 297
C4	21.4	0.364 877	4 306	1 571	3 142
C5	20.4	0.348 572	4 339	1 512	3 025
C6	19.5	0.333 807	4 368	1 458	2 916
C7	18.8	0.322 266	4 394	1 416	2 832
C8	18.2	0.312 335	4 418	1 380	2 760
C9	17.7	0.304 033	4 439	1 350	2 699
C10	17.2	0.295 708	4 454	1 317	2 634
C11	16.8	0.289 032	4 467	1 291	2 582
C12	16.4	0.282 341	4 472	1 263	2 525

加载在模型上表面的压力荷载还包括塔的自重 0.260 N/mm²;拉索的垂向力引起的模型上表面压力

荷载 4.736 N/mm²,两者合计为 4.996 N/mm²。

4 计算结果

(1) 索鞍下部与混凝土接触部位的计算结果如图 2~5 所示。

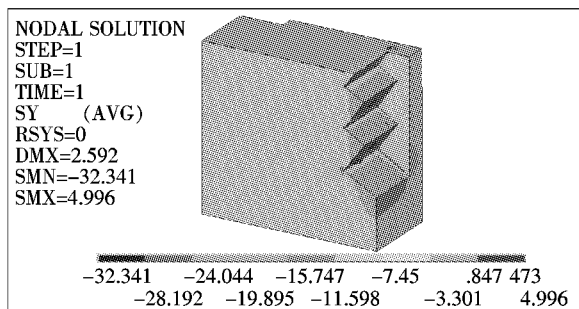


图 2 索鞍部位的混凝土塔柱外表面

y 向应力云图(单位:MPa)

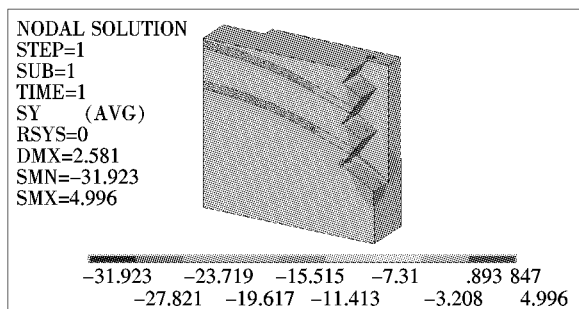


图 3 混凝土塔柱索鞍部位切面 y 向应力云图

(右侧面)(单位:MPa)

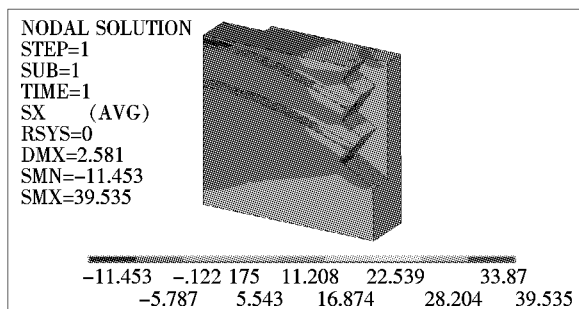


图 4 混凝土塔柱索鞍部位切面 x 向应力云图(单位:MPa)

由图 2~5 可知:在索鞍力作用下,在索鞍下部出现规则的竖向(沿 y 轴方向)压应力,大小为 7.31~11.41 MPa;x 方向索鞍弧形内侧基本呈受压状态,在索鞍的圆弧段与直线段交界部位,会出现 x 方向拉应力,最大拉应力为 1.15 MPa,均小于 C55 复合纤维混凝土的标准抗拉和抗压强度值。

(2) 主塔变截面处应力计算结果如图 6~10 所示,x 轴方向索塔整体变形图见图 11。

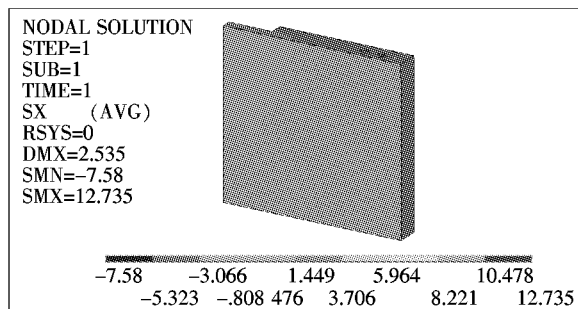


图 5 靠近端板附近的应力计算结果(单位:MPa)

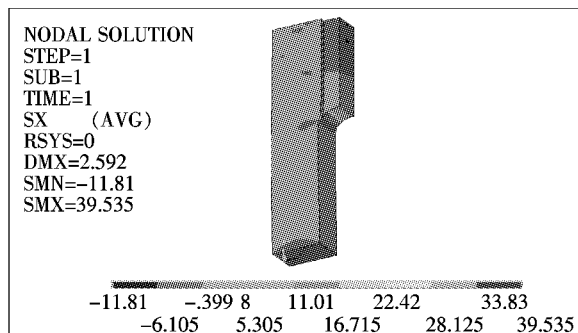


图 6 主塔整体 x 轴方向应力云图(正面)(单位:MPa)

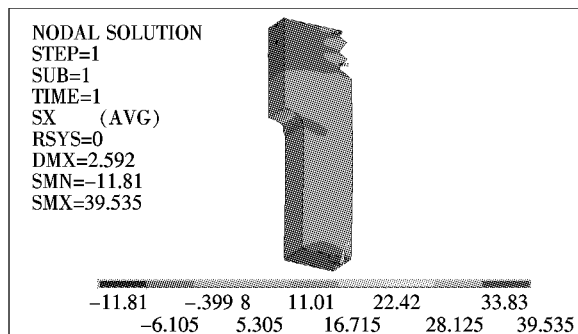


图 7 主塔整体 x 轴方向应力云图(交界面)(单位:MPa)

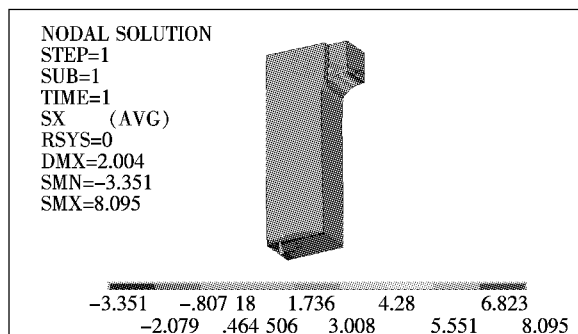


图 8 主塔变截面处 x 轴方向应力(单位:MPa)

由图 6~8 可得:从索塔整体 x 方向受力情况看,在塔柱分叉区(上塔柱与下塔柱交界部位)存在较小区域的沿 x 轴方向的拉应力,具体如图 9 所示,拉应力最大为 8.10 MPa,出现在弧形段顶部。超过 C55 混凝土拉应力限值 1.89 MPa,但仅出现在弧形顶部很小的

局部范围内。这是由于上、下索塔交界部位截面变化,下索塔节段受力为偏心力导致。由图 10 可知:下索塔上部 y 方向应力为内侧大,外侧小,而下索塔下部的 y 方向应力为内侧小,外侧大;由图 11 可知:下索塔整体向 x 方向弯曲变形,在距离桥面 5~6 m 的位置,弯曲变形最大,数值为 0.3 mm。

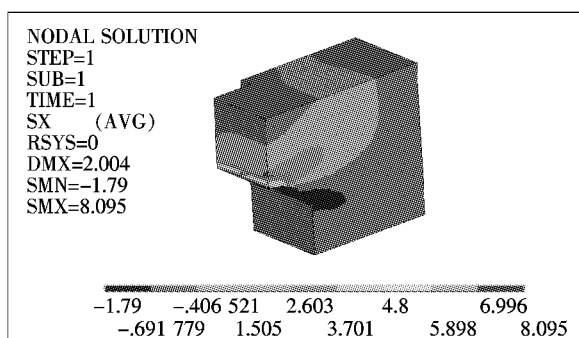


图 9 主塔变截面处 x 轴方向局部应力(单位:MPa)

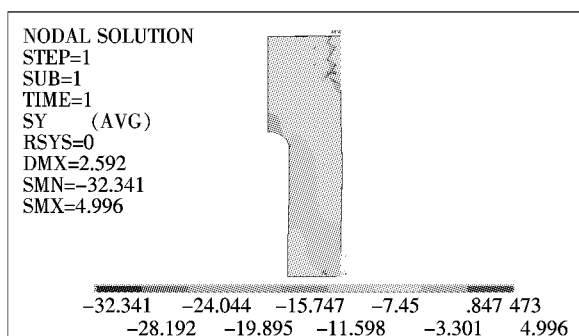


图 10 索塔整体 y 方向应力(单位:MPa)

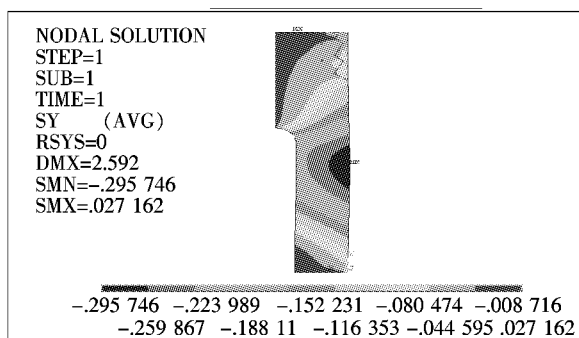


图 11 x 轴方向索塔整体变形图(单位:mm)

5 改进措施

索塔整体 x 方向塔柱分叉区的弧形顶段小范围内的混凝土拉应力超过规范限值。拟采取如下措施:

① 在拉应力超限部位采用钢纤维混凝土,其抗拉强度为普通混凝土的 1.8 倍,增加混凝土的抗拉强度设计值;② 在索塔截面分叉区段内增加横向钢筋的布置;

③ 在弧形段顶部设置一排沿 x 方向的型钢。

通过采取以上改进措施,经计算该桥索塔 x 方向的拉应力满足规范要求。

6 结论

采用大型通用有限元软件对矮塔斜拉桥混凝土分叉形索塔进行了有限元分析,对每个分丝管用实体单元进行模拟,钢丝在索鞍上的作用力采用垂直于索鞍分丝管的法向面力进行模拟,分析桥塔索鞍区及塔柱分叉区的混凝土应力,得出如下结论。

(1) 索塔锚固区采用分丝管索鞍结构,索鞍与混凝土接触部位的混凝土应力满足 C55 强度设计要求。

(2) 对于底部分叉形索塔,双肢分叉结合部位索塔变截面处易出现拉应力,应根据拉应力大小及范围,采用钢纤维混凝土、增加型钢及加密普通钢筋等措施,改善截面变化处的混凝土拉应力。

(3) 对于底部分叉形索塔,分叉位置往往为结构受力的薄弱部位,因此建议将塔柱分叉位置与斜拉索锚固区保持一定的安全距离,以减小索塔分叉处的拉应力,并根据需要在局部范围采用加强配筋等措施来改善塔柱分叉区受力。

参考文献:

- [1] 毛晓东.铁路矮塔斜拉桥索梁锚固区局部应力分析[J].兰州交通大学学报,2018(4).
- [2] 冯玉权.重载铁路斜拉桥拉索疲劳及索塔锚固区应力研究[D].石家庄铁道大学硕士学位论文,2017.
- [3] 方志纯.安海湾大桥索塔锚固区局部应力分析[J].湖南交通科技,2017(4).
- [4] 何国锐.矮塔斜拉桥 V 形索塔及分丝管索鞍空间受力分析[J].城市道桥与防洪,2015(6).
- [5] 罗志东,湛楹.大跨度矮塔斜拉桥塔梁墩固结处局部应力分析[J].西部交通科技,2016(5).
- [6] 刘尊稳,陈兴冲,张永亮,等.矮塔斜拉桥分丝管索鞍区受力特征研究[J].桥梁建设,2018(5).
- [7] 莫恺筠.大跨度铁路矮塔斜拉桥索塔锚固区混凝土应力测试与分析[D].兰州交通大学硕士学位论文,2018.
- [8] 郝文化. Ansys 土木工程应用实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [9] 王乎佳,陈洪军. ANSYS 工程分析进阶实例[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [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].