

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.040

南洞庭胜天大桥塔上钢锚梁受力性能研究

刘斌^{1,2}, 李瑜¹

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410219; 2. 中南大学 土木工程学院)

摘要:以主跨 450 m 的南洞庭胜天大桥为工程背景,采用整体杆系有限元计算和局部精细化的实体板壳有限元计算相结合的方法,基于 5 种受力工况条件,研究了大跨度斜拉桥塔上钢锚梁的传力机理和受力特性。研究表明:钢锚梁的构造合理,整体受力性能良好,传力路径明确;通过模拟钢锚梁边界条件的变化,优化其制造及安装工序;恒载、标准组合、超载工况下钢锚梁 Mises 等效应力绝大部分区域分别小于 47.1、70.6、102 MPa, Mises 等效应力最大值分别为 141、212、307 MPa。超载工况下,钢锚梁最大 Mises 等效应力大于钢材应力容许值,但小于钢材屈服强度,钢锚梁能满足桥梁的正常使用和极限状态下的受力要求。

关键词:大跨度斜拉桥; 钢锚梁; 板壳结构; 有限元模型; 边界条件

斜拉索作为大跨度斜拉桥的主要受力构件和生命线,其两端锚固结构的可靠性将直接影响大桥的使用安全。其中斜拉桥塔上锚固结构是承受斜拉索的巨大拉力,再将索力匀顺地传递至索塔的重要构造。斜拉索塔上锚固类型主要有钢锚梁、锚箱及同向回转索等。

钢锚梁可将绝大部分斜拉索水平分力转化为钢结构的自身轴力,大幅减小混凝土塔臂受力,在大跨度斜拉桥塔上锚固结构中得到了广泛应用。钢锚梁承受巨大的索力,构造处理不当将导致传力路径不明确、应力集中而局部屈曲等严重后果。因此,研究钢锚梁受力性能、明确钢锚梁的传力机理并优化钢锚梁构造具有重要的现实意义。

该文以湖南南洞庭胜天大桥为工程背景,采用整

体杆系有限元计算和局部精细化的实体板壳有限元计算相结合的方法,研究大跨度斜拉桥塔上钢锚梁的传力机理和受力特性,为类似桥梁的设计研究提供参考。

1 工程背景

湖南南县至益阳高速公路起点接岳常高速公路、终点接长常高速公路,与益阳绕城线相接,南洞庭胜天大桥是南县至益阳高速公路的控制性工程。

胜天大桥主桥为(181.95+450+181.95) m 双塔双索面斜拉桥,主桥长 813.9 m,结构整体为半漂浮体系,见图 1。索塔位置设竖向支座、横向抗风支座、纵向每个索塔设置 2 个黏滞性阻尼器;过渡墩设竖向支座。

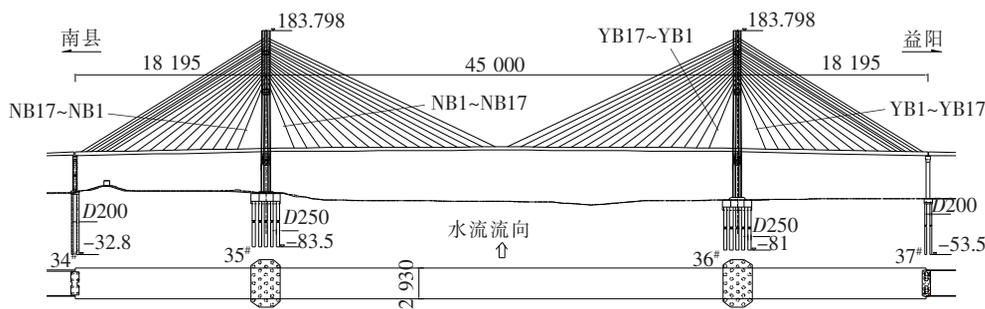


图 1 南洞庭胜天大桥总体布置(除标高单位为 m 外,其余:cm)

收稿日期:2020-11-11

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(编号:2015CB057701);湖南省交通科技项目(编号:201522);湖南省创新创业团队支持计划项目(湖南交通设计院高性能材料创新创业团队)

作者简介:刘斌,男,博士研究生,工程师, E-mail: 342429101@qq.com

1.1 主梁

经变更后最终实施的大桥主梁采用扁平钢箱梁(图2),其顶板为正交异性钢桥面板。箱梁全宽 29.9 m,钢梁中心线处梁高 3 m(内轮廓),桥面设双向 2%

横坡。索梁连接锚拉板焊于边腹板处的顶板上。钢箱梁两侧设置钢结构风嘴,桥面铺装采用(改性浇筑式沥青混凝土+高弹改性沥青混凝土)结构形式,总厚度为 7.5 cm。

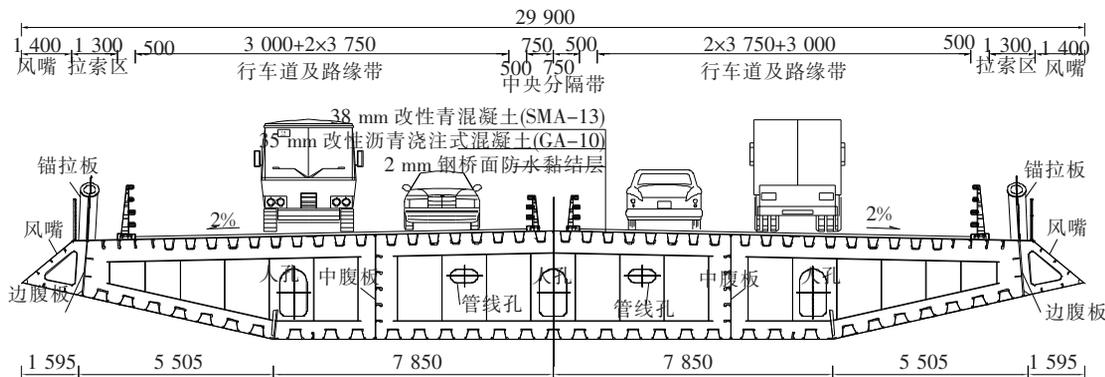


图2 主梁标准横断面(单位:mm)

1.2 索塔

南洞庭胜天大桥索塔整体塔型采用宝瓶形索塔。索塔塔柱为钢筋混凝土结构,横梁张拉预应力混凝土结构。主塔全高(从承台顶面起算)小里程岸桥塔为 154.298 m,大里程岸桥塔为 159.798 m。

塔柱采用空心矩形断面,塔柱纵桥向宽 8~9 m,横桥向宽 4.8~8.0 m。在索塔横向外侧刻有深度 30 cm 的景观槽。

1.3 钢锚梁

南洞庭胜天大桥斜拉索塔端锚固采用钢锚梁形式,钢锚梁的竖向支撑采用钢牛腿形式。单个索塔钢锚梁共 34 套。具体构造见图 3。

塔柱采用空心矩形断面,塔柱纵桥向宽 8~9 m,

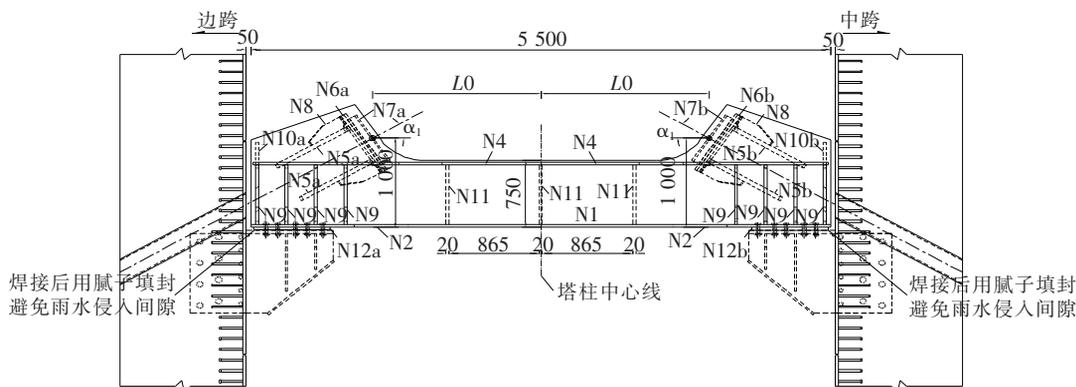


图3 钢锚梁立面布置图(单位:mm)

2 传力机理分析

2.1 水平传力机理分析

斜拉索分别锚固在钢锚梁两端的锚垫板上,锚垫板通过两侧的斜腹板将索力传递给钢锚梁,竖向分力传递给钢牛腿,水平分力则大部分转化为钢锚梁内力,剩余较小的水平分力再传递至索塔。不同受力状态下,钢锚梁、钢牛腿的约束条件有所不同,恒载时为一

端固定一端顺桥向滑动(边跨侧可滑动),成桥后为两端固定。

(1) 一端固定、另一端顺桥向滑动

斜拉索索力的横向水平力均通过两端的高强螺栓,先传递至钢牛腿,再由钢牛腿传至索塔。

斜拉索索力的顺桥向水平分力可通过钢锚梁自身平衡;两侧斜拉索水平分力不相等时,剩余水平力由固定约束端高强螺栓抗剪以及滑动约束端钢锚梁和钢牛腿间的摩擦,将力传递至混凝土索塔。

胜天大桥滑动端钢锚梁与牛腿间设四氟滑板,摩擦系数小,即摩擦力对混凝土所受力的影响小。故在有限元分析计算时,未考虑滑动端钢锚梁与钢牛腿间的摩擦。

(2) 两端固结

斜拉索索力的横向水平分力通过两端的高强螺栓和焊缝传至钢牛腿,再由钢牛腿传至索塔。而顺桥向水平分力一部分由钢锚梁承担,另一部分通过两端的高强螺栓和焊缝,传递给钢牛腿,由钢牛腿传递给索塔。钢锚梁与混凝土塔臂通过变形协调来分配斜拉索水平分力。

2.2 竖向传力机理分析

直接作用在钢锚梁上的斜拉索索力,主要通过钢-混凝土和剪力钉界面摩擦等传递至混凝土塔臂,其中剪力钉、钢牛腿腹板和 PBL 键是传递剪力及变形协调的传力构件。

在斜拉索竖向分力的作用下钢牛腿发生竖向变形引起剪力钉和钢牛腿腹板弯曲和剪切变形,把斜拉索竖向力从剪力钉和钢牛腿腹板传递到混凝土塔臂上,钢牛腿和混凝土塔臂协调变形,完成拉索竖向力的分配。

3 钢锚梁受力特性

3.1 整体计算结果

全桥采用空间有限元 Midas 程序计算,其中斜拉索采用只受拉单元模拟,其余单元采用梁单元模拟。

根据整体计算结果,考虑恒载、活载、汽车制动力、温度力、风荷载及不均沉降等荷载的综合作用,按规范要求组合,斜拉索的恒载索力及最大、最小索力如图 4 所示。

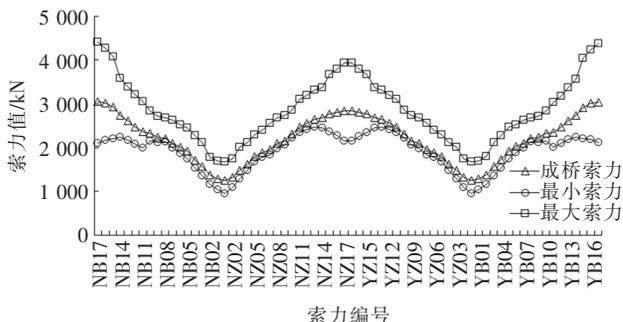


图 4 斜拉索索力包络图

3.2 钢锚梁计算模型

3.2.1 结构离散图

为更精细地分析锚梁的受力性能,需对钢锚梁

进行精细有限元分析。因 NGML17 钢锚梁对应的 NB17、NZ17 斜拉索成桥恒载索力最大,基于大型有限元分析软件 Ansys14.5 建立 NGML17 钢锚梁的板壳有限元计算模型。所有板件均采用 Shell63 壳单元模拟,混凝土采用 Solid45 实体单元模拟。钢锚梁节段有限元模型共约 34 万个节点、26 万个单元。坐标系: X 轴为横桥向(向外为正), Y 轴为竖向(向上为正), Z 轴为顺桥向(向边跨侧为正)。

3.2.2 边界条件

计算中将索塔锚固区节段顶部设为自由端,满足实际索塔受力情况,节段底部完全约束。假定牛腿壁板与索塔混凝土之间紧密连接,采用共节点进行模拟。在恒载索力作用下,钢锚梁与牛腿之间约束条件采用一端固定另一端滑动(边跨侧可滑动);成桥后,钢锚梁与牛腿之间约束条件采用两端固定。

钢锚梁与牛腿间的顺桥向滑动约束:在钢锚梁底板与牛腿顶板间,建立横桥向和竖向的平移自由度约束。固定约束:在钢锚梁底板与牛腿顶板间,建立平移和旋转 6 个自由度约束。

3.3 荷载工况

组合工况 1:恒载索力;组合工况 2:1.0P, P 为设计最大索力值(标准组合);组合工况 3:NB17 斜拉索最大设计索力 + NZ17 斜拉索恒载索力;组合工况 4:NB17 斜拉索恒载索力 + NZ17 斜拉索最大设计索力;组合工况 5:1.5P(超载工况)。

以上组合中索力值均取自南洞庭胜天大桥 Midas 整体计算,最大设计索力均指标准组合下斜拉索的最大设计索力。

组合工况 1 作用下,钢锚梁与牛腿之间的约束条件为一端固定另一端滑动。工况 2~5:恒载作用下,钢锚梁与牛腿间的约束条件为一端固定另一端滑动;其余荷载作用下,为两端固定。

3.4 钢锚梁分析结果

工况 1 恒载作用下,钢锚梁 Mises 等效应力分布云图见图 5,拉应力为正,压应力为负,下同。

由图 5 可知:工况 1(即恒载)作用下,钢锚梁 Mises 应力水平整体较低,绝大部分区域 Mises 等效应力小于 47.1 MPa。钢锚梁承压板、腹板与底板相交处(塔臂端)有应力集中现象,Mises 应力最大值达 141.0 MPa,但应力集中区域很小。

钢锚梁顺桥向应力云图如图 6 所示。

由图 6 可知:工况 1(即恒载)作用下,钢锚梁顺桥向应力水平整体较低,绝大部分区域顺桥向应力小于

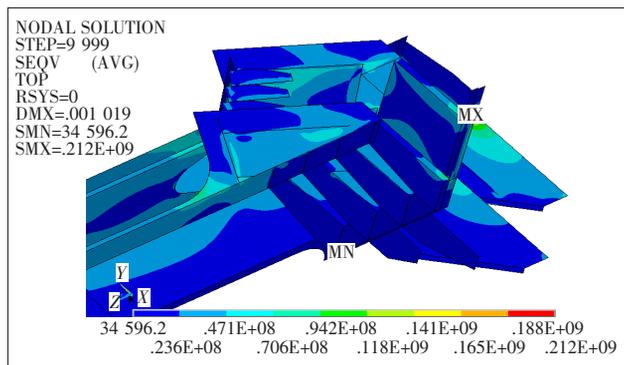
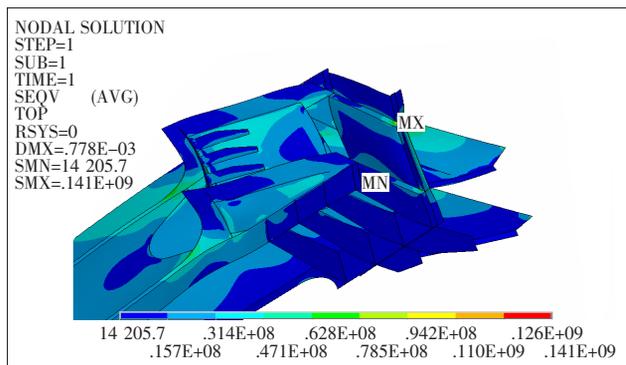
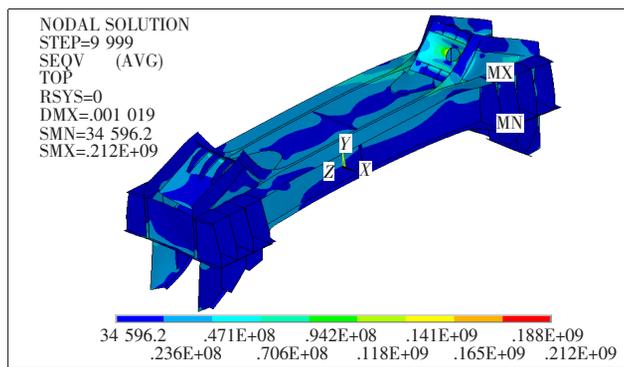
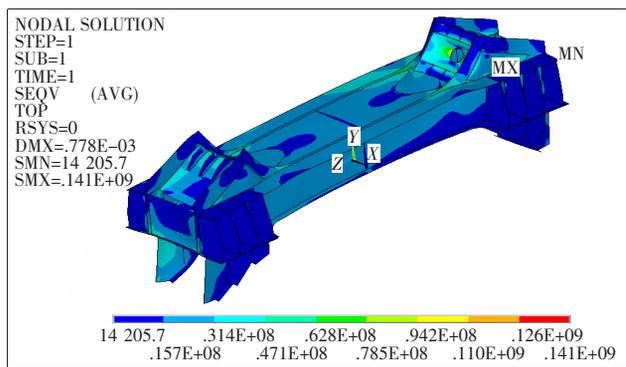


图5 钢锚梁 Mises 应力云图(工况 1)(单位:Pa)

图7 钢锚梁 Mises 应力云图(工况 4)(单位:Pa)

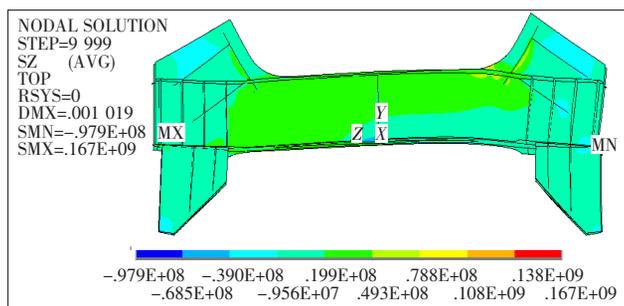
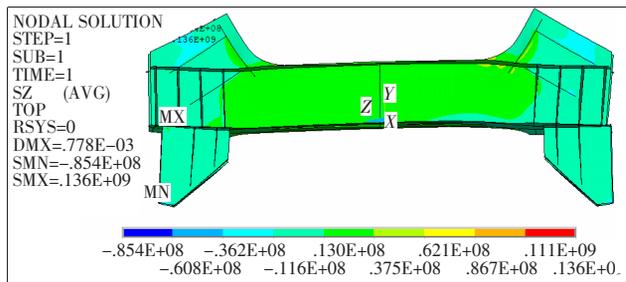


图6 钢锚梁顺桥向应力云图(工况 1)(单位:Pa)

图8 钢锚梁顺桥向应力云图(工况 4)(单位:Pa)

37.5 MPa。由于恒载作用时,钢锚梁与牛腿之间约束条件为一端固定另一端顺桥向滑动,故钢锚梁两端斜拉索顺桥向水平分力绝大部分由钢锚梁自身平衡,此时钢锚梁起到拉杆的作用。因此,从应力云图可以看出,钢锚梁腹板与顶板中间段的顺桥向应力分布均匀,且基本小于 30 MPa,钢锚梁的拉杆效应较显著。

工况 1 作用下,横桥向和竖向应力水平整体均较低,绝大部分区域应力(绝对值)分别小于 10.0 MPa 和 20.0 MPa。承压板开孔处等小区域出现应力集中,但横桥向和竖向应力(绝对值)均小于 73.7 MPa 和 135.0 MPa。

工况 2~5 作用下,由于约束条件相同,荷载设计值相当,文中仅列出工况 4 计算结果。钢锚梁 Mises 等效应力见图 7、8。

由图 7 可知:工况 4 作用下,钢锚梁 Mises 应力水平整体较低,绝大部分区域 Mises 等效应力小于 70.6 MPa。钢锚梁承压板、腹板与底板相交处(塔臂端)有应力集中现象,Mises 应力最大值达 212.0 MPa,但应力集中区域很小。

由图 8 可知:工况 4 作用下,钢锚梁顺桥向应力水平整体较低,绝大部分区域顺桥向应力小于 49.3 MPa,钢锚梁牛腿顶板与塔臂相连处存在应力集中现象,最大值达 167.0 MPa,但应力集中区域较小,边、中跨侧钢牛腿顶板顺桥向应力大于 108.0 MPa 的区域约为 $0.01 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。

工况 4 作用下,横桥向和竖向的应力水平整体均较低,绝大部分区域应力(绝对值)分别小于 27.4 MPa 和 50.6 MPa。承压板开孔处等小区域出现应力集中

现象,但横桥向和竖向应力(绝对值)均小于 97.0 MPa 和 202 MPa。

工况 1~5 的计算结果如表 1 所示。

表 1 钢锚梁应力及变形结果

工况	应力最大值/MPa			变形/ mm	
	Mises	顺桥向	横桥向		
1	141	136	73.7	135	0.78
2	205	161	106	196	1.10
3	196	130	99.3	188	1.21
4	212	167	97	202	1.02
5	307	242	159	293	1.65

计算结果表明:

(1) 大桥采用钢锚梁构造合理,整体受力性能良好,传力路径明确。

(2) 在各正载工况(工况 1~4)作用下,钢锚梁的 Mises 等效应力整体均较小。恒载作用下(工况 1),钢锚梁绝大部分区域 Mises 等效应力均小于 47.1 MPa;最不利标准组合作用下(工况 2~4),钢锚梁绝大部分区域 Mises 等效应力小于 70.6 MPa;超载工况(工况 5),钢锚梁绝大部分区域 Mises 等效应力小于 102 MPa。

(3) 恒载作用下(工况 1),钢锚梁 Mises 等效应力最大值为 141 MPa;最不利标准组合作用下(工况 2~4),钢锚梁 Mises 等效应力最大值为 212 MPa;超载工况(工况 5),钢锚梁 Mises 等效应力最大值为 307 MPa。在最不利标准组合作用下,钢锚梁均处于弹性工作状态,钢锚梁 Mises 等效应力最大值为 212 MPa,发生在钢锚梁腹板上,小于钢材的容许值 265 MPa。超载工况(工况 5)作用下,钢锚梁最大 Mises 等效应力为 307 MPa,大于钢材相应的容许值,但小于 Q345D 钢材的屈服强度 345 MPa。

(4) 在各最不利工况作用下,钢锚梁的位移均很小,工况 1~5 空间位移的最大值分别为 0.78、1.10、1.21、1.02 和 1.65 mm,钢锚梁的最大位移均出现在钢锚梁承压板上。

4 钢锚梁制造及安装

根据设计计算结果并结合施工实际,拟定钢锚梁的具体制造及安装步骤如下:

(1) 钢锚梁、钢锚梁牛腿在工厂各自组焊成形并进行试拼装,安装工装用临时加固匹配构件。检验整体几何尺寸、塔臂板面平整度、对接偏差和栓孔重合率

等,检验合格后完成各部位防腐涂装。

(2) 钢锚梁与牛腿的接触面为四氟板滑动摩擦副,消除摩阻力对索塔的影响,确保斜拉索恒载平衡水平分力转化为钢锚梁内力。为减小钢锚梁摩擦副的摩阻力,安装前在四氟板面涂抹硅脂。

(3) 钢锚梁、牛腿在工厂中采用高强螺栓临时连接进行整体组装,并确保高强螺栓螺母端朝下方(最终在索塔上的状态),工厂组装时可采用临时加固匹配构件,形成整体结构后出厂。

(4) 钢锚梁、牛腿整体吊装完成后,按施工进度浇筑相应节段塔柱混凝土,在张拉对应斜拉索前,释放边跨侧高强螺栓预紧力为 0(注意确保螺母及垫圈不脱落),拆除工装用临时加固匹配构件。

(5) 为避免斜拉索不平衡水平分力较大对索塔的不利影响,要求边跨侧与跨中侧斜拉索对称同步张拉,斜拉索不平衡水平分力不大于 200 kN。为防止施工过程中两侧拉索安装不同步导致钢锚梁冲击塔臂,应采取相应的临时防护措施(如在钢锚梁与塔臂间设置临时挡块等)。

(6) 桥面铺装荷载就位后,拧紧钢锚梁与钢牛腿间的连接螺栓(拧紧到规范规定的预紧力),再将钢锚梁垫板与钢牛腿顶板焊接形成固结连接(焊缝均为三边围焊,靠近塔臂不能焊接的一边涂腻子密封,以防止雨水侵入)。钢锚梁与钢牛腿间的连接采用先栓后焊的制造及安装工序,应在焊接 24 h 后对高强螺栓进行补拧。

5 结论

以南洞庭胜天大桥为工程背景,采用整体杆系有限元计算和局部精细化的实体板壳有限元计算相结合的方法,研究了大跨度斜拉桥塔上钢锚梁的传力机理和受力特性,得到以下结论:

(1) 大桥采用的钢锚梁构造合理,整体受力性能良好,传力路径明确。

(2) 通过模拟钢锚梁边界条件的变化,优化了钢锚梁制造及安装工序。

(3) 恒载、标准组合、超载工况下钢锚梁 Mises 等效应力绝大部分区域分别小于等于 47.1、70.6、102 MPa, Mises 等效应力最大值分别为 141、212、307 MPa,超载工况下,钢锚梁最大 Mises 等效应力大于钢材应力容许值,但小于钢材屈服强度,钢锚梁能满足桥梁的正常使用和极限状态下的受力要求。