

# 某独塔自锚式悬索桥吊杆锚固区细部应力分析

杜鑫<sup>1</sup>, 李杰<sup>1\*</sup>, 杨纪<sup>2</sup>, 怀臣子<sup>2</sup>, 冯冠杰<sup>1</sup>, 张波<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河勘测规划设计有限公司)

**摘要:**为了获得自锚式悬索桥吊杆锚固区复杂应力分布以便优化设计,以某独塔自锚式悬索桥吊杆锚固结构为研究对象,采用有限元分析软件建立吊杆主梁锚固区局部应力分析模型,分析吊杆主梁锚固结构在运营最不利工况下各构(板)件的应力情况。分析结果表明:锚管下部1/4管段、加劲板N57、加劲板N58、托架腹板N14a和横梁腹板是主要传力构件;托架腹板N14a、横梁腹板、箱梁外腹板N3和托架底板的节点位置应力值相对较大,存在应力集中,需要优化结构形式以改善受力。

**关键词:**自锚式悬索桥;吊杆锚固;局部应力;数值分析

吊杆锚固区是独塔自锚式悬索桥中极其复杂和重要的部位,关系到整个桥梁的安全性,是悬索桥设计的关键问题之一。其作用是将主梁的荷载可靠地传递给吊杆。卢颖等介绍了斜拉桥常见的索梁锚固形式(锚拉板式结构、耳板式结构、锚管式结构和锚箱式结构等)并分析了锚拉板式锚固结构的局部应力,明确结构最大等效应力发生在钢箱梁腹板与钢锚箱承压板相交处;高何杰等针对斜拉桥结构中索—梁锚固结构进行足尺疲劳模型试验,研究了其传力机理;莫山峰等研究了大跨度钢拱桥索锚管式锚固区的受力特点和应力集中现象;欧阳青等指明了独塔斜拉—自锚式悬索组合桥吊杆锚固区传力途径,并依据锚固区各构件应力和变形情况对锚固区构造进行优化,提出对横隔板增加横向与纵向肋条的方案,效果显著;叶锡钧等通过对锚箱式索梁锚固区的局部应力分析,得出在锚箱下部区域的应力最大且存在面外位移,从此位置向四周应力逐渐减小,此处应力为控制应力;王少怀等对斜拉桥耳板式索梁锚固区进行了应力分析;胡正荣等通过建立空间实体单元有限元模型,对双塔拱式斜拉桥索塔锚固区钢锚箱结构的应力状态和应力分布规律进行仿真分析;陆新征、周萌、刘俊卿、聂建国等提出了多尺度模型高效计算方法对结构进行受力分析。可以看出:吊杆锚固区的应力状态、变形情况复杂,并常伴随应力集中现象,因此应对其进行局部受力分析,以便进行局部

设计优化,确保锚固区结构安全、受力合理。

## 1 工程概况

某大桥跨径布置为(50+40+190+110+40)m,其中主跨(190+110)m为独塔钢箱梁自锚式悬索体系,次边跨和边跨与主跨设计为连续体系,桥型布置如图1所示。吊杆主梁锚固区构造如图2所示,其结构包括锚管、锚垫板、加劲板、托架和横梁腹板等。吊杆主梁锚固区构造形式是锚管(N55)焊接在托架腹板N14和N14a之间,锚垫板(N56)垂直焊接在锚管上并在锚管和托架顶(底)板焊接处做加劲处理安装加劲板,再将整个锚管结构连接在纵梁腹板上。吊杆索力通过钢锚箱的锚垫板以四边支撑形式将压应力分散传递到托架底板上,并通过锚管作为剪应力传递给托架腹板,最后通过外腹板(N3)和横梁腹板(N12、N13)将吊杆索力传递到整个箱梁,锚垫板及腹板均设置加劲板,以利于锚固处的应力扩散避免受力集中。

## 2 吊杆钢箱锚固区计算模型

主梁钢箱梁采用Q345qD材料:取弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比为0.3,质量密度为 $7.85$  g/cm<sup>3</sup>;采用Von-Mises应力衡量拉索钢箱梁锚固区

收稿日期:2019-04-19

基金项目:河南省重点研发与推广(科技攻关)专项(编号:192102310227)

作者简介:杜鑫,男,硕士研究生, E-mail:1466237724@qq.com

\* 通信作者:李杰,男,教授, E-mail:lijie2007@zzu.edu.cn

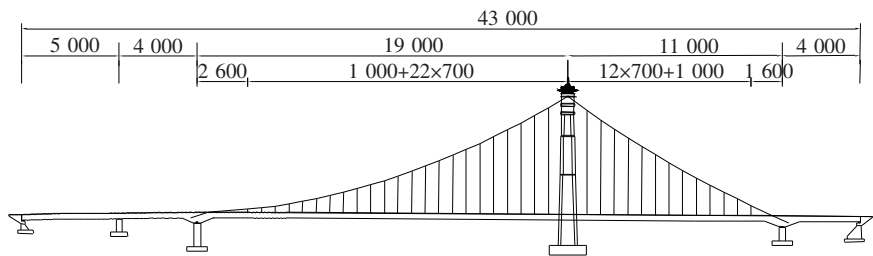


图 1 桥型布置(单位:cm)

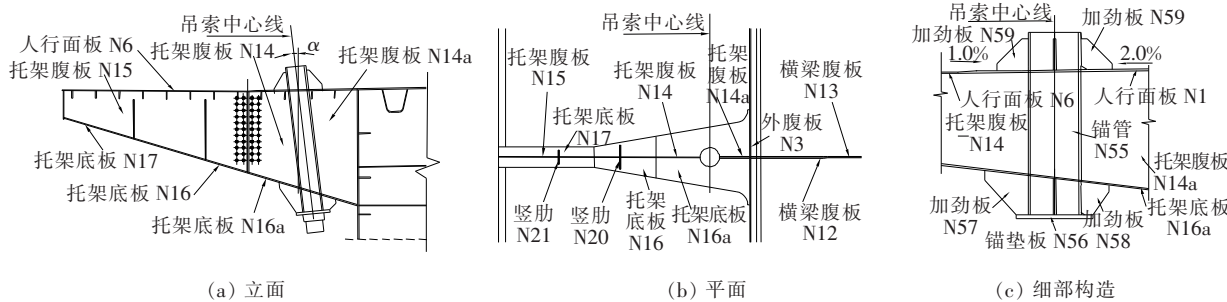


图 2 吊杆主梁锚固区构造

应力状态。依照 GB/T 714—2015《桥梁用结构钢》，板厚不大于 50 mm 时，Q345qD 钢材屈服强度为 345 MPa。

采用通用有限元分析软件，考虑到计算精度及模型规模，利用结构对称承受对称荷载的受力特点，建立吊杆主梁锚固区局部应力分析模型。模型取一半箱梁施加边界条件，吊杆荷载依照设计给出的吊杆最大索力加载，加载位置在锚管的下锚垫板，加载方式采用节点集中力荷载，节点力施加在锚垫板的圆周节点上，方向为锚管轴向。模型沿桥梁纵向取 10.5 m 长度，以锚管位置为中心向两侧各取 5.25 m，为减小位移边界条件和荷载边界条件的影响，假定边界箱梁截面的约束条件完全固结施加约束自由度。板单元结构采用 Shell181 单元进行离散，单元厚度根据设计图纸的结构钢板厚度设置[钢锚箱主要承压构件锚垫板(N56)采用 32 mm 厚钢板，锚管(N55)采用 20 mm 厚钢管，锚固端加劲肋(N57、N58、N60)均采用 12 mm 厚钢板，加劲肋(N59)采用 10 mm 厚钢板，除托架腹板(N14a)加厚处理采用 32 mm 厚钢板其余托架腹板、底板均采用 12 mm 厚钢板]，离散后结构单元数量共 97 389 个，各板件间的连接均采用共节点连接。

### 3 吊杆钢箱锚固区局部应力分析

#### 3.1 钢箱整体及锚管应力分析

图 3、4 为钢箱梁、锚管 N55 的 Von Mises 应力。

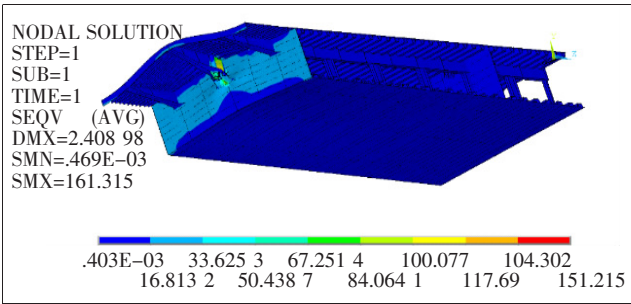


图 3 钢箱梁 Von Mises 应力(单位:MPa)

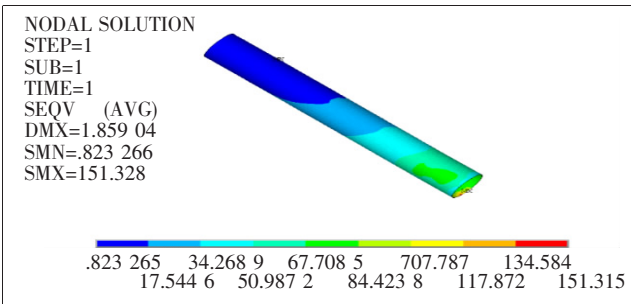


图 4 锚管 N55 的 Von Mises 应力(单位:MPa)

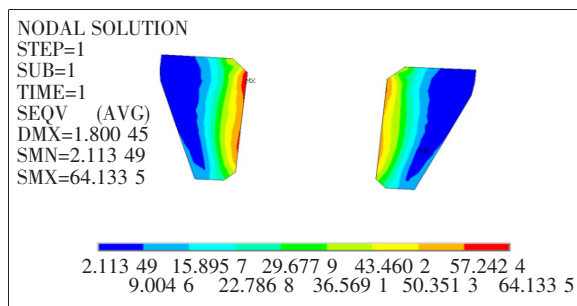
由图 3 可知:结构在最大吊杆力作用下,Von Mises 应力为 0~151.32 MPa,远离锚管的钢箱梁结构应力很小,大小为 0~16.8 MPa,且主要是对箱梁外腹板的影响,其他结构 Von Mises 应力基本无影响(接近于零),可见吊杆力作用下的应力影响范围有限,仅限于锚固区局部范围,计算选取的结构范围是合理的,可以反映吊杆力作用下的局部受力问题。

由图 4 可知:锚管受力分布并不均,在锚管上部约 1/3 的管段应力很小,小于 17.54 MPa,锚管中间约 1/3 管段应力较小,其值为 17.54~50.99 MPa,锚管只在下部 1/4 管段内存在较大的应力值,并存在应力集中现象,最大应力为 151.32 MPa。可见吊杆锚固区整个锚管结构均参与结构受力,其下部 1/4 管段为主要承力部位,应对其进行优化设计增加刚度,以保证锚管结构受力安全且相对均匀。

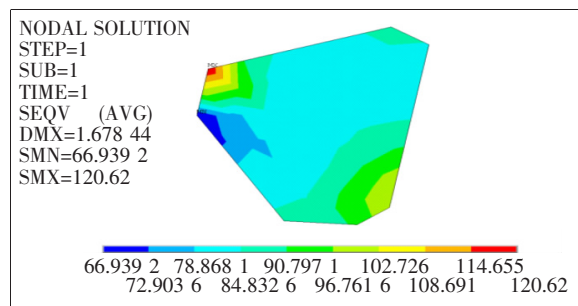
### 3.2 加劲板应力分析

加劲板 N60 的 Von Mises 应力如图 5(a)所示,加劲板的应力较小,最大应力为 64.13 MPa。加劲板 N58 的 Von Mises 应力如图 5(b)所示,加劲板的应力较大,其值为 66.94~120.62 MPa,该加劲板存在受力集中点,最大应力为 120.62 MPa。加劲板 N57 的 Von Mises 应力如图 5(c)所示,加劲板的应力较大,其值为 37.78~82.27 MPa,该加劲板存在受力集中点,

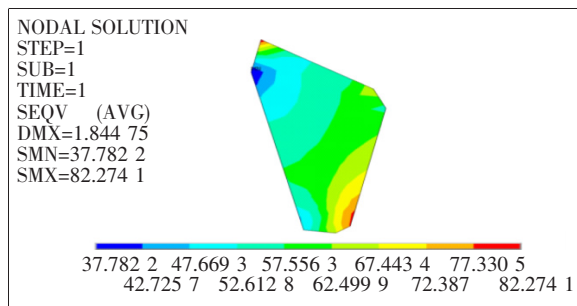
最大应力为 82.27 MPa。加劲板 N59 的 Von Mises 应力如图 5(d)所示,加劲板的应力较小,其值为 0~48.5 MPa,该加劲板存在受力集中点,最大应力为 48.50 MPa,应力水平低,其中与托架腹板 N14a 连接的加劲板较其他 N59 加劲板受力大。锚固区底端加劲板 N58、N57 与加劲板 N60 的 Von Mises 应力相比,加劲板 N58、N57 所受应力明显较大。锚固区顶端加劲板 N59 也有相似的受力分布,即与托架腹板 N14、N14a 相连接的加劲板受力更大,其所受应力约为不与托架腹板相连的加劲板的 2 倍。对比加劲板 N58 与 N57 的 Von Mises 应力可知,与托架腹板 N14a 相连加劲板(N58)所受应力是与托架腹板 N14 相连加劲板(N57)的 1.5 倍。因此通过锚管传递来的吊杆力主要通过锚固区底端加劲板(N58、N57)传递给与主梁相连的托架腹板(N14a、N14),靠近主梁侧的托架腹板 N14a 是更主要的受力构件。



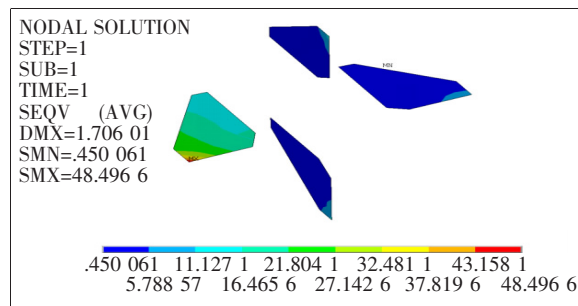
(a) 加劲板 N60



(b) 加劲板 N58



(c) 加劲板 N57



(d) 加劲板 N59

图 5 加劲板 Von Mises 应力(单位:MPa)

### 3.3 锚垫板与横梁腹板应力分析

锚垫板 N56 的 Von Mises 应力如图 6 所示,锚垫板的应力较小,最大应力为 72.73 MPa。横梁腹板 N12、N13 的 Von Mises 应力如图 7 所示,横梁腹板应力分布范围较大,应力分布不均匀,应力范围为 0~106 MPa,应力集中位置位于箱梁外腹板 N3、托架腹板 N14a、托架底板 N16 和横梁腹板结合点,该点存在

应力集中,最大应力为 106 MPa,应力在局部扩散后迅速减小,其他位置应力很小,接近于 0。

### 3.4 托架板应力分析

托架腹板 N14a 的 Von Mises 应力较大,是锚管受力传递到托架及箱梁的重要传力构件,托架腹板的应力范围为 38.64~133.4 MPa,该腹板处于应力水平相对较高区域,最大应力为 133.4 MPa。托架腹板

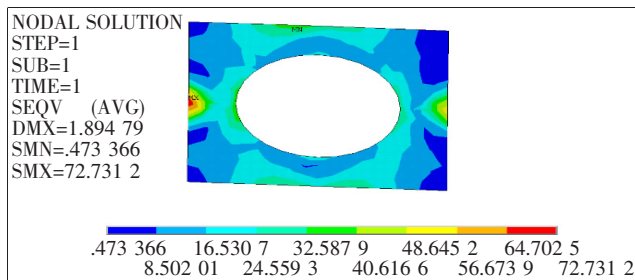


图6 锚垫板 N56 的 Von Mises 应力(单位:MPa)

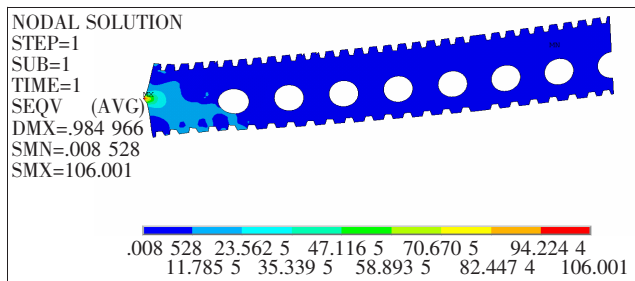


图7 横梁腹板 N12、N13 的 Von Mises 应力(单位:MPa)

N14、N15 的 Von Mises 应力小,托架腹板的应力范围为 0~46.7 MPa,该腹板应力集中较小,应力最大值位于腹板与锚管连接的位置,其他位置受到的应力很小。托架底板 N16 的 Von Mises 应力分布范围较大,应力极不均匀,应力范围为 0~156.54 MPa,应力集中位置位于箱梁外腹板 N3、托架腹板 N14a、托架底板 N16 和横梁腹板的结合点,该点存在应力集中,最大应力为 156.54 MPa,应力扩散后迅速减小,其他位置应力很小。托架底板 N17 的 Von Mises 应力很小,范围为 0~13.76 MPa。托架竖肋 N20 的 Von Mises 应力很小,范围为 0~0.67 MPa。

## 4 结论

(1) 吊杆力作用下结构的应力影响范围有限,应力随距锚固位置距离增加迅速扩散减小;为保证结构受力安全,应关注局部结构受力设计。

(2) 吊杆锚固结构在吊杆力作用下的主要传力构件是:锚管下部 1/4 管段、加劲板 N57、加劲板 N58、托架腹板 N14a、横梁腹板。尤其是锚管受力极不均匀,锚管下部 1/4 管段所受最大应力约为锚管上部 1/3 管段的 8.6 倍,为锚管中间 1/3 管段的 3 倍。针对锚管受力特性,可对其进行结构优化,增加锚管下部 1/4 管段的局部厚度或者对其进行局部内、外加劲,减小锚管局部受力,增大结构安全性。

(3) 吊杆锚固结构在吊杆力作用下主要传力途径

为:锚垫板→锚固结构底端加劲板、锚管→托架底板、托架腹板 N14a→外腹板 N3→横梁腹板→整个主梁。

(4) 结构的最大 Von Mises 应力为 156.54 MPa,远小于 Q345qD 屈服强度,局部应力分布基本均匀,应力水平安全。

(5) 结构受力存在应力集中位置,该位置位于托架腹板 N14a、横梁腹板、箱梁外腹板 N3 和托架底板的节点位置,应力值相对较大,影响结构的使用安全,应对锚固构造进行优化,改善结构的应力分布使构件传力更合理。可增加横梁腹板 N12 长度并增大其厚度,必要时应减小外腹板 N3 加劲肋条间距。通过增大锚固区段横隔板刚度或者外腹板刚度,降低钢锚箱及钢锚梁的应力与变形,缓解钢锚梁角点应力集中。另外钢锚箱为全焊结构,多条焊缝为受力焊缝,应严格保证焊接质量。

## 参考文献:

- [1] 周良. 上海闵浦二桥索梁钢锚箱锚固区应力分析[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程分会、上海市城乡建设和交通委员会第十九届全国桥梁学术会议论文集(下册), 2010.
- [2] 卢颖,徐荣鹏. 高家花园轨道桥钢箱梁段索梁锚固区局部应力分析[J]. 公路交通技术, 2016(6).
- [3] 高何杰,袁怡. 大跨叠合梁斜拉桥的索梁锚固形式及疲劳性能研究[J]. 中外公路, 2018(1).
- [4] 莫山峰,李文武,戎华钦. 基于 ANSYS 的索锚管式锚固区应力分析[J]. 山东交通学院学报, 2011(3).
- [5] 欧阳青,赵国虎,齐宏学. 独塔斜拉自锚式悬索桥吊杆锚固区有限元仿真分析[J]. 中外公路, 2017(4).
- [6] 叶锡钧,安关峰,颜全胜,等. 大跨度斜拉桥钢锚箱局部应力分析[J]. 中外公路, 2013(6).
- [7] 王少怀,向中富,谢秉敏,等. 斜拉桥耳板式索梁锚固区应力分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012(4).
- [8] 胡正荣,陈亮,刘金平. 双塔拱式斜拉桥索塔锚固区受力性能数值分析[J]. 中外公路, 2014(6).
- [9] 陆新征,林旭川,叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2008(4).
- [10] 周萌,宁晓旭,聂建国. 系杆拱桥拱脚连接结构受力性能分析的多尺度有限元建模方法[J]. 工程力学, 2015(11).
- [11] 刘俊卿,乔龙帮,朱超,等. 基于子结构的多尺度模型高效计算方法研究[J]. 建筑结构, 2016(S2).
- [12] 聂建国,周萌,姬同庚,等. 基于多尺度模型的自锚式钢箱梁悬索桥主缆锚固区受力性能研究[J]. 土木工程学报, 2014(6).
- [13] GB/T 714—2015 桥梁用结构钢[S]