

大跨度矮塔斜拉桥索梁锚固区受力分析

汪凡¹, 鲁晓磊²

(1. 中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉中合众建筑科学工程有限公司, 湖北 武汉 430033)

摘要: 以汉江上的某矮塔斜拉桥为研究对象, 采用三维有限元方法对索梁锚固处的受力特性进行分析。模型中按照实际情况施加三向预应力, 边界荷载根据全桥整体计算结果进行模拟, 重点讨论了锚固区的集中应力效应和剪力滞效应。研究结果表明: 索梁锚固区的最大主压应力出现在锚垫板下与斜拉索套管相交的孔道边缘处; 在桥梁斜拉索的拉力影响之下, 超宽箱梁可能会因为梁上剪力滞的存在而产生包括混凝土开裂、钢结构屈曲失稳等不安全因素, 应该在桥梁设计过程中予以足够重视。研究成果可为类似桥梁拉索梁锚固的设计和施工提供参考。

关键词: 矮塔斜拉桥; 索梁锚固区; 受力分析; 剪力滞; 桥梁设计

中图分类号: U448.27; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)03-0173-04

Analysis on Mechanical Behavior of Cable-Beam Anchorage Zone of Long-Span Low-Pylon Cable-Stayed Bridge

WANG Fan¹, LU Xiaolei²

(1. Central South Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Zhonghezhong Construction Science and Engineering Co., Ltd., Wuhan 430033, China)

Abstract: Taking a low-eyon cable-stayed bridge over Hanjiang River as a research object, the three-dimensional finite element method is used to analyze the force properties at the cable-beam anchorage zone. The three-dimensional prestress is applied in the model according to the actual situation. The boundary load is simulated based on the overall calculation results of the whole bridge. The concentrated stress effect and the shear lag effect in the anchorage zone are discussed particularly. The study result shows that the maximum principal compressive stress of cable-beam anchorage zone appears at the edge of the duct which intersects the stayed cable sleeve under the anchor plate. Under the influence of the tension of the bridge stayed cable, the ultra-wide box girders may experience unsafe factors such as concrete cracking and buckling instability of steel structures due to the existence of shearing force lag on the girders, which should give the sufficient attention in the process of bridge design. The research results can provide the reference for the design and construction of the cable-beam anchorage of similar bridges.

Keywords: low-eyon cable-stayed bridge; cable-beam anchorage zone; force analysis; shearing force lag; bridge design

0 引言

矮塔斜拉桥在跨度在100~300 m时, 其结构性能和各项经济指标均具有较大优越性, 因而在国内得到了大量使用。但矮塔斜拉桥整体结构的可靠性, 很大程度上是由锚座的稳固程度来决定的。矮塔斜拉桥的锚座主要由垫板、导筒、混凝土及其所配钢筋组成, 而从高强斜拉索上传来的巨大应力由垫板部分承受, 因此在锚座周围会出现非常明显的应力集

中现象。在这一位置, 无论是混凝土裂纹尖端点上产生的应力场, 还是由结构上主应力以及最大剪应力产生的形状不规则的密集迹线, 都十分复杂。为了探清混凝土矮塔斜拉桥索梁锚固区域的复杂受力行为, 许多学者采用不同方法作了相关研究。黄思友等^[1]通过采用弹性边界条件的索梁锚固区精细化分析模型, 对索梁锚固区的主梁进行参数分析, 研究了索梁锚固区主梁在不同状态下的应力分布规律。黄斌等^[2]采用ABAQUS有限元分析软件, 建立了精细化索梁锚固区实体有限元模型, 分析在最不利荷载工况下该区域的受力状态。吕文舒等^[3]基于大型通用有限元软件ANSYS, 分析了在最大索力工况下双索面矮塔斜拉桥索梁锚固区受力特性, 并对于主

收稿日期: 2025-06-12

作者简介: 汪凡(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事路桥设计工作。

通信作者: 鲁晓磊(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事工程检测工作。电子信箱: 826534962@qq.com

拉应力较大的锚固块与边腹板结合处、锚固处腹板与横梁结合处等位置进行了配筋加强设计。华波等^[4]研究了组合式锚拉板索梁锚固区构件受力和抗疲劳性能。梅应华等^[5]分析了摩擦对锚拉板与混凝土主梁的受力影响。毛晓东^[6]以1座铁路矮塔斜拉桥实例为背景,采用梁单元与实体单元组合方式模拟了局部分析模型的边界,探究了在不利荷载组合工况下索梁锚固区域的受力特性。由此可见,锚座区周围的局部设计是相当复杂而困难的^[7]。本文以汉江上某矮塔斜拉桥为例,针对矮塔斜拉桥的索梁锚固区进行了受力分析,得到了其应力分布规律,并给出了相关设计建议。

1 工程概况

作为本文算例的横跨汉江的特大桥梁地处汉江上游的郧县境内,位于县内河流急弯和琵琶滩峡谷之间的开阔部分。在桥梁设计过程中,设计方根据桥梁自身所承受的荷载状况、施工过程中需要采用的方法、桥梁造价的经济性,同时结合当地自然景观进行综合考量,确定了桥梁设计采用矮塔斜拉桥桥型。大桥主桥总长合计492 m,由于桥梁在设计时提出了保证通航的要求,因此单孔单向的通航孔径不能小于82 m,单孔双向的通航孔径不能小于157 m。为应对此项要求,大桥纵向采用128 m+238 m+128 m的3跨布置结构。支承主梁的桥塔共计2个,桥塔的墩高分别为78、84.6 m。桥面宽度共计26.5 m,设计为双向4车道高速公路,行车速度设计为80 km/h。桥梁防洪能力设计为可抵御300年一遇洪水,抗风采用24.3 m/s的基准风速设计,抗震设计的基本烈度为Ⅵ度,实际设计当中按照Ⅶ度考虑。桥梁总体布置图见图1。

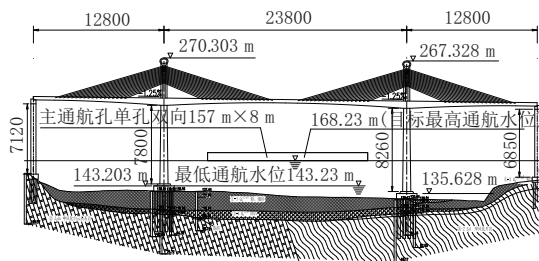


图1 桥梁总体布置图(单位:cm)

2 计算梁段尺寸

大桥主梁采用单箱3室截面,主梁顶板宽度为26.5 m,采用C55混凝土进行施工。主梁截面为变截面形式,在跨中部分梁高3.4 m,在桥塔处梁高7.2 m。

桥梁中跨有长度为24 m的一截等高度段,边跨端部和桥塔位置节段长度分别为20.8、6 m;除此之外的部分,梁段底部位置均可以使用1.8次抛物线进行描述,抛物线部分在水平方向投影的长度为104 m。桥梁标准节段长度为4.0 m,截面断面顶底板厚度分别为30、28 cm,边中腹板厚度分别为45、60 cm。梁段上锚固斜拉索位置设置厚50 cm,带有过人孔的横隔板。主梁标准断面见图2。

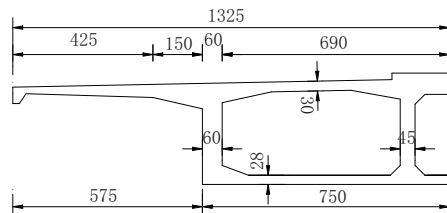


图2 主梁标准断面(单位:cm)

本研究选取主梁中高度最小的跨中梁段为研究对象。该主梁高3.4 m;为了消除边界条件对计算结果的影响,计算模型选取主梁跨中的5个节段,梁段总长度达到20 m。梁段计算模型见图3。

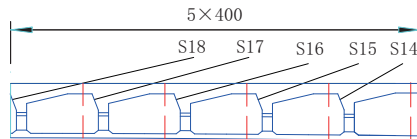


图3 梁段计算模型(单位:cm)

3 有限元建模

采用大型通用结构分析软件ANSYS,对该桥选定的索梁锚固区进行三维建模分析。有限元模型采用的参数如下:

(1)单元:主梁所采用的混凝土箱梁及设置在主梁当中的预应力钢束分别采用三维SOLID65单元及LINK8单元进行模拟,截面两端采用MPC184单元模拟刚臂,然后在MPC184单元上施加梁段内力边界。

(2)材料特性:混凝土箱梁按照容重26 kN/m³计算;预应力钢绞线按照78.5 kN/m³取值。

(3)边界条件:箱梁的一端($z=0$ m)上的节点在 y 、 z 方向平动约束;在另一端($z=20$ m)上的节点在 y 、 x 方向平动约束。其中 x 轴水平垂直桥轴, z 轴水平沿桥轴, y 轴竖直向上。

(4)荷载:考虑混凝土梁段的自重、斜拉索索力、结构预应力荷载、包括精轧螺纹钢的作用、梁段两端内力等。索力及截面内力按照全桥杆系计算的结果取定,取短期荷载下主梁最大轴力工况计算,具体取值见表1。

表 1 模型索力及梁端内力取值

计算位置	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
近塔截面	163 668	-7 048.0	63 796.0
远塔截面	149 733	-1 659.0	62 393.0
拉索 S18	10 526		
拉索 S17	10 348		
拉索 S16	10 163		
拉索 S15	9 871		
拉索 S14	9 686		

注:两端弯矩作用方向为使梁下侧受拉;轴力为使主梁两端受压,模型内力正负方向根据右手法则确定;索力为同一节段上 2 根索力之和。

(5)加载方式:模型中索力作为面荷载加载到对应的拉索作用面上;截面内力加到截面形心的节点上,该形心点的节点通过刚臂与该截面上所有节点连接。

(6)预应力在结构中的模拟:横向预应力布置于顶板内,钢束规格为 5- $\phi_s15.2$,钢绞线的抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$,张拉控制应力为 1 395 MPa。横隔板预应力采用 19- $\phi_s15.2$,张拉控制应力为 1 395 MPa。竖向预应力采用 JL32 精轧螺纹钢,布置于箱梁腹板内,间距为 50 cm,抗拉强度标准值 $f_{pk}=785\text{ MPa}$,张拉控制应力 $\sigma_{con}=706.5\text{ MPa}$ 。考虑预应力损失,横向和横隔板预应力的作用按照 0.9 的效应作用于结构上;竖向预应力作用按照 0.5 的效应作用于结构上^[8]。

根据以上建模原则建立了梁段的三维有限元计算模型,对拉索位置处的拉索管道、横隔板、人洞、主梁横向预应力、竖向预应力及横隔板预应力、锚垫板等均进行了模拟。梁段的三维有限元模型见图 4(a),锚固区的局部有限元模型见图 4(b),预应力钢束布置的有限元模型见图 4(c)。

4 结果分析

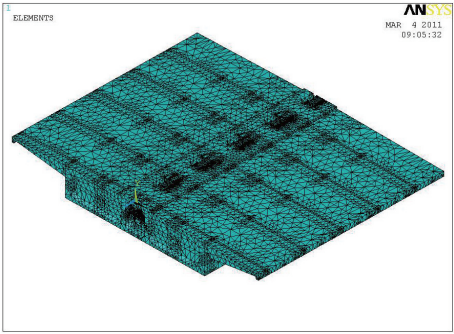
三维有限元模型长 20 m,为了消除边界条件的影

4.1 锚固区应力

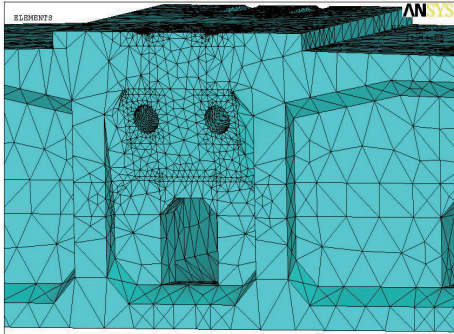
箱梁锚固区应力图见图 5。

由图 5(a)可知:主梁锚固区横向最大压应力为 -12.7 MPa,出现在横向预应力扁锚位置处;斜拉索锚垫板附近出现了 1.5 MPa 左右的拉应力,但是超过 1.5 MPa 的区域较小,主要是在拉索钢管口与混凝土交接的地方。

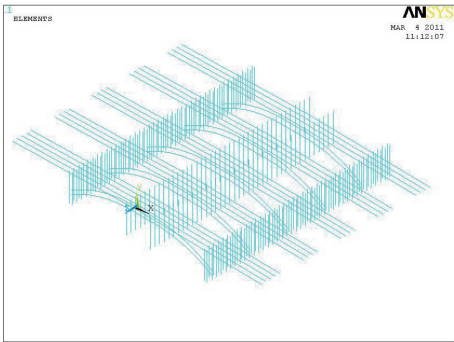
由图 5(b)可知:主梁锚固区纵向最大压应力达到 -16.9 MPa,出现在锚垫板下的混凝土位置;最大拉应力为 0.79 MPa,出现在横隔板与边腹板下缘交



(a) 节段模型



(b) 锚固区局部模型



(c) 预应力钢束模型

图 4 有限元模型

接处,这是由于在交接处存在应力集中的现象。

由图 5(c)可知:主梁锚固区域附近的最大主拉应力为 2.5 MPa,并且拉应力为 2.5 MPa 的区域较小。

由图 5(d)可知:主梁锚固区的最大主压应力为 -18.3 MPa,出现在锚垫板下与斜拉索套管相交的孔道边缘,区域较小。

总体来看,悬索锚固区域的横向、纵向正应力及主压应力均处于较低水平。根据应力分布特征可以推断出:锚垫板边缘附近虽存在 1.5 MPa 左右的拉应力,但其作用区域局限于拉索钢管口与混凝土交接处等局部位置,且最大主压应力(-18.3 MPa)仅出现在锚垫板与斜拉索管套相交的孔道边缘。即高应力值仅出现在局部构造衔接部位,未在锚固区域大面积扩展。这在一定程度上表明双斜拉索体系能够通过优化传力路径实现荷载的分散传递。

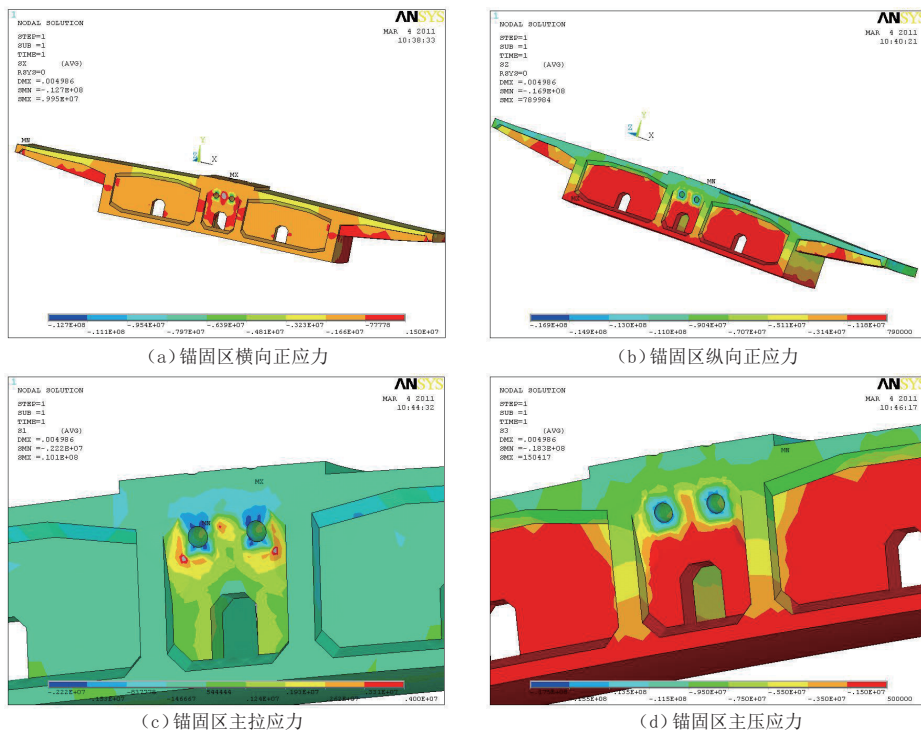


图5 箱梁锚固区应力(单位:Pa)

4.2 锚固区剪力滞

箱梁纵向应力沿箱梁顶横向分布图见图6。

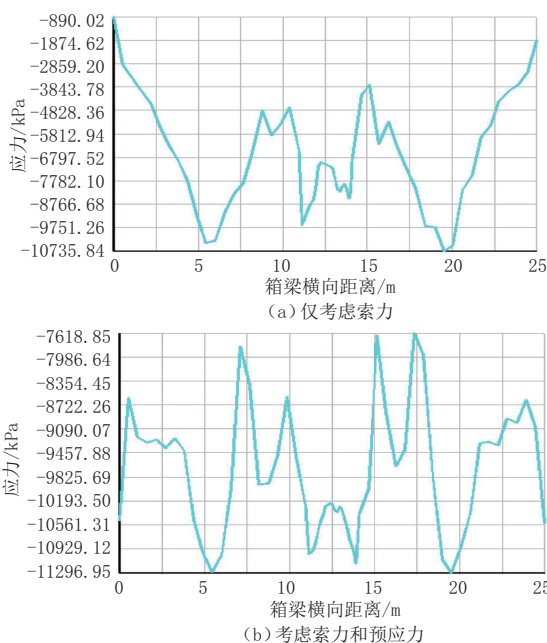


图6 箱梁纵向应力沿箱梁顶横向分布图

由图6(a)可知:箱梁顶板横向分布应力为仅考虑中央斜拉索作用下的应力。而在图6(b)中,箱梁顶板横向分布应力为同时考虑在拉索索力、主梁自重、纵横向预应力等作用下,箱梁顶板沿横桥方向的纵向应力分布情况。由此可知,压应力均会集中在箱梁边腹板(横向距离5.75、20.75 m)的位置;而这2块区域之外的位置压应力相对较小,说明正剪力滞现象出现于箱梁的顶板位置。

在图6(b)箱梁顶部的应力横向分布中可以看出,箱梁边腹板和边缘处的应力差距较为明显,前者可以达到1.0 MPa,但是后者就降低到0.18 MPa。由此表明,在大悬臂段位置,箱梁的剪力滞系数偏大,剪力滞现象较为明显。在仅考虑索力和同时考虑预应力时,箱梁的剪力滞系数分别为1.3和1.2左右,说明比起仅有索力作用的情况,处于实际应力状态下的箱梁剪力滞系数会比较小,但设计中仍然不能忽视剪力滞对于矮塔斜拉桥超宽箱梁的影响。

由于斜拉桥体系的复杂性,主梁在斜拉索的作用下,拉索水平分力沿纵桥向形成向桥塔累积的轴向力;此外主梁在恒载、活载等共同作用下,处于轴力、剪力和弯矩共同作用的复杂受力状态,这与简单梁体系有着显著差异^[9]。特别是在考虑斜拉索力、主梁自重以及纵横向预应力等作用时,大悬臂段位置的剪力滞系数较大,表明主梁的剪力滞效应不能忽视。

5 结 语

(1)索梁锚固局部区域的横向、纵向正应力及主压应力均存在应力集中效应,最大主压应力出现在锚垫板下与斜拉索套管相交的孔道边缘处。

(2)箱梁在斜拉索锚固之后,会产生一定的剪力滞现象,此种现象在设计中属于偏不安全因素,今后在设计类似超宽箱梁矮塔斜拉桥时应当引起注意。

(下转第181页)