

东明黄河大桥滑动索鞍的结构设计 及应用分析研究

黄子能¹ 冯新宽¹ 覃巍巍¹ 彭春阳¹ 武俊彦²

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545006

2 北京交科公路勘察设计研究院有限公司 北京 100191)

摘 要:滑动索鞍是东明黄河大桥改造工程新型钢丝斜拉体系的关键技术,当钢丝斜拉索两端的索力不均时,滑动索鞍可以通过滑动来实现两端索力的调节,使两端索力逐渐趋向于平衡。文中介绍了滑动索鞍的构造和功能,并通过理论计算和应用ANSYS有限元分析软件对滑动索鞍进行受力分析,证实了滑动索鞍的结构安全可靠,能满足桥梁寿命设计的要求。

关键词:新型钢丝斜拉体系 滑动索鞍 结构设计 有限元分析

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2017.02.006

1 研究背景

目前,针对危旧桥梁的斜拉索体系改造技术,主要为加固部分斜拉索。就矮塔斜拉桥结构而言。矮塔斜拉桥由矮塔、索鞍、钢绞线斜拉索、主梁构成。索鞍作为矮塔斜拉桥的一个关键传力点,能够将拉索拉力传递到塔上。钢绞线斜拉索通过穿过埋在桥塔内的索鞍为斜拉索实现转向提供有效的作用。钢绞线拉索通过锚固固定,使斜拉索的作用力传到桥塔。斜拉索索鞍区域设有抗滑装置,避免拉索在使用过程中出现滑移。当拉索两端存在不平衡力时,桥塔通过抗滑装置,抵消通过桥塔的抗剪能力。但抗滑装置存在一定的局限性,当桥塔两端的索力不平衡过大,抗滑前置就无法有效解决此类问题,因而一种新的解决方案:滑动索鞍的设计研究便势在必行。滑动索鞍是在参考悬索桥索鞍结构的基础上对索鞍进行创新设计,用滚轴组件来代替聚四氟乙烯板。滚轴组件的作用是使传递来的集中荷载均匀分布在索鞍底板上,同时将原来的滑动摩擦转化成滚动摩擦,从而减少滑动面的摩擦系数。当温度变化的影响导致斜拉索两端产生不平衡力时,滑动索鞍可以通过滑动实现两端索力的调节,在滑动一定距离后,两端的索力逐渐趋向于平衡。

本文通过介绍滑动索鞍在东明黄河大桥改造

工程中的应用,来验证滑动索鞍的结构设计和应用效果,证实滑动索鞍的结构安全性和应用可行性。

2 工程概况

东明黄河大桥位于山东省菏泽市,是国道106线上一座重要跨黄河的特大桥梁。大桥全长4142.14m。主桥为预应力混凝土连续刚构与连续梁组合结构桥。由于长期的超负荷运营,桥梁出现了箱梁腹板开裂和跨中持续下挠的病害。桥梁管理部门对主桥箱梁的裂缝和桥面的线形进行了六年的观察和监测,发现主桥箱梁腹板的开裂和跨中下挠等桥梁问题正在持续恶化。为解决箱梁腹板开裂和跨中持续下挠的病害,对主桥进行新型钢丝斜拉体系改造;由于东明黄河大桥的箱梁腹板开裂和跨中持续下挠的病害比较严重,如采用矮塔斜拉桥的加固方式时,受桥塔两端的温度差影响,桥塔两端的索力严重不均衡,增大了不平衡力,原有的抗滑装置无法有效的解决此问题。东明黄河大桥的斜拉体系改造工程是介于矮塔斜拉桥和悬索桥之间的一种新型桥体,因而拉索的锚固体系采用钢丝斜拉桥的形式,并在桥塔边塔处设置滑动索鞍,通过索鞍滑动消除不平衡力作用下桥塔根部弯矩的问题。桥梁加固效果图见图1。

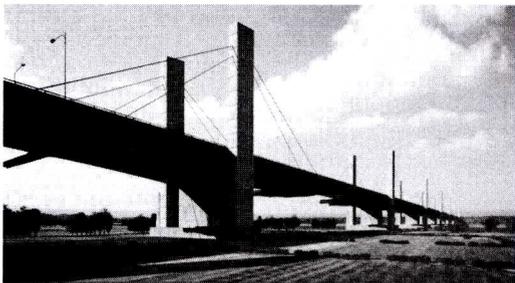


图1 桥梁加固效果图

3 滑动索鞍的整体构造

滑动索鞍是东明黄河大桥改造工程新型钢丝斜拉体系的关键技术，其整体构造需满足以下的技术要求：（1）滑动索鞍的结构具有可以通过滑动索鞍来实现两端索力的调整，使两端趋向于平衡的功能；（2）滑动索鞍的滑动副应具有低的摩擦系数，以及良好的滑动性和耐磨性；（3）滑动索鞍的结构安全可靠和耐久性高，能满足桥梁寿命设计的要求；

根据前面的分析及研究，得到滑动索鞍的整体构造如图2所示，它主要包括鞍盖、鞍体、滚轴组件、索鞍底板和侧挡板等，其中鞍体及索鞍底板的滑动面镶嵌耐磨板。

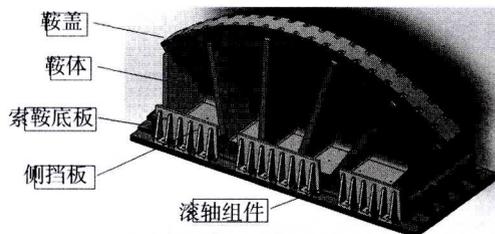


图2 滑动索鞍的整体构造图

4 滑动索鞍的结构设计

4.1 滑动索鞍的设计说明

东明黄河大桥的斜拉索采用 $\phi 5.5-301$ 不锈钢平行钢丝索体，拉索设计的最大力为 $F_c=4500\text{kN}$ ，拉索与鞍体竖直中心线的夹角为 54.3° ；滑动索鞍的结构图见图3，主要构件包括索鞍体、滚轴组件和索鞍底板和侧挡板等：

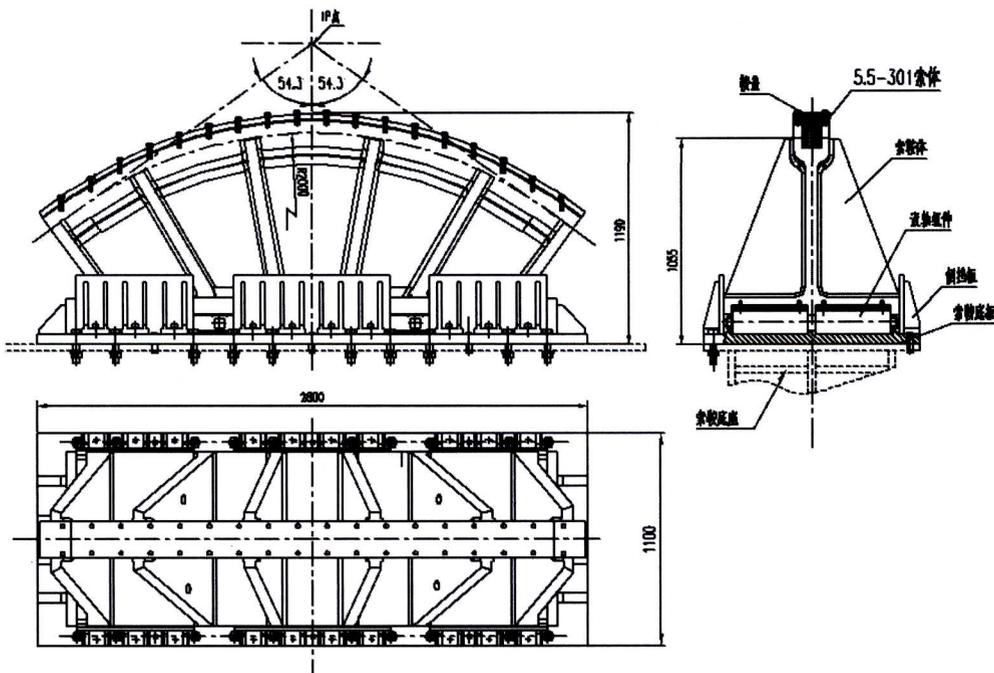


图3 滑动索鞍结构图

索鞍体将拉索的轴向压力传递给滚轴组件，其结构由鞍体和滑动板镶嵌而成。鞍体采用ZG270-480H整体铸造，结构满足悬索桥索鞍的规范要求；滑动板采用40Cr钢板经过特殊热处理工艺，提高其表面硬度和光滑度，使其的滑动面具有良好的耐磨性和滑动性；

滚轴组件将拉索的轴向压力传递给索鞍底板，由多个滚轴和连接板组合而成。滚轴采用轴承钢GCr15经过调质处理，提高其表面耐磨性和滑动性能；

索鞍底板将拉索的轴向压力传递给索鞍底座（桥塔），由底板、限位板和两端挡块组成。底

板采用40Cr钢板经过特殊热处理工艺,其滑动面具有良好的耐磨性和滑动性;限位板的作用是限制滚轴组件,使其只能按顺桥方向滑动。挡块是限制滑动索鞍的滑动范围。

4.2 索鞍鞍体的理论计算:

索鞍鞍体的结构设计按照公路悬索桥设计规范的要求进行理论计算。

4.2.1 鞍槽的设计

索鞍鞍槽的尺寸计算公式:

$$\text{宽度: } b = n_{wt} (d_w + \Delta_{ww}) \quad (1)$$

$$\text{高度: } h = (\pi d_w^2 n_{ws}) / 4b (1 - V_s) \quad (2)$$

其中: n_{wt} —单排钢丝数量;

d_w —钢丝直径;

Δ_{ww} —钢丝直径的允许正偏差;

n_{ws} —拉索钢丝总数量;

V_s —鞍槽内拉索的空隙率

按照钢丝的排布结构,将参数代入公式(1)、(2),得到鞍槽的尺寸。

4.2.2 鞍体的校核计算

两侧拉索索力的法向力作用于鞍体鞍槽上,通过鞍槽圆弧段结构传到整个鞍体结构上,鞍体结构的下平面再传递给滚轴组件,然后再从滚轴组件传递到索鞍底板。按索鞍鞍槽法向应力分布做纵向平面受力分析(见图4)。Y方向受力平衡可得:

$$q = N/R \quad (3)$$

N 取拉索最大拉力值 F_c 、 R 为鞍体的圆弧半径值,将鞍体的数据代入公式(3)可求得法向力 q ; 索鞍所受均布应力公式:

$$P = q/S \quad (4)$$

其中: S —索鞍鞍槽底面面积: $S = Lb$

将索鞍的数据代入公式(4)中,求得索鞍的应力 P 。

4.3 索鞍滑动副的理论计算

滑动索鞍的滑动副由鞍体滑动板、滚轴组件和底板滑动板组成,依据《公路悬索桥设计规范》及圆柱体与平面的接触应力受力分析(见图5)和计算公式:

$$\sigma = 0.418 \sqrt{FE/IR} < 3\sigma_s \quad (5)$$

其中: F —作用在当个滚轮上的荷载

E —材料的弹性模量

L —滚轴宽度

R —滚轴半径

将滑动副的数据代入公式(5)中,求得滑动副的接触应力 σ 。

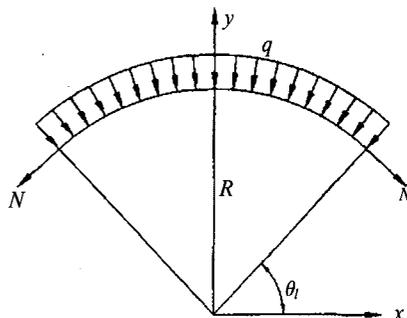


图4 索鞍鞍槽法向应力分布

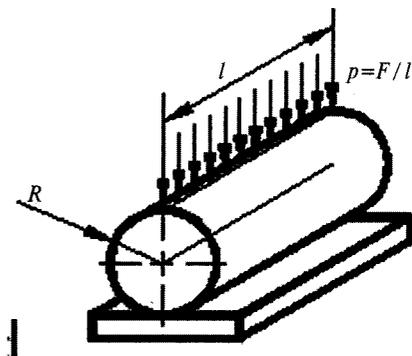


图5 圆柱体与平面的受力

4.4 索鞍底板挡块的可靠性计算

索鞍底板的两端设置挡块,用来限制在不平衡力的作用下索鞍的滑动量,东明大桥理论设计的索鞍滑动量为 $\pm 50\text{mm}$,最大不平衡力2000kN。在不平衡力作用下,索鞍底板挡块的受力简图如图6所示。

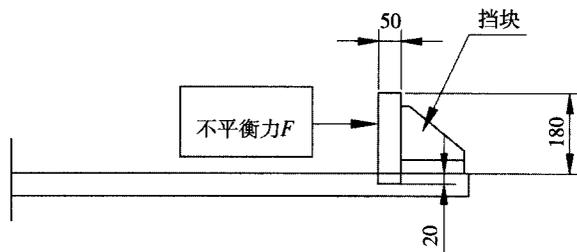


图6 挡块的受力简图

根据钢结构的接触压力公式计算:

$$\sigma = F/S \quad (6)$$

其中: F —作用在挡块的荷载,即不平衡力;

S —挡块的接触面积;

将挡块和不平衡力 F 的数据代入公式(6)中,可求得挡板的接触应力 σ 。

5 鞍体的有限元分析

5.1 鞍体有限元模型的建立

索鞍的鞍体由ZG270-480H材料铸造而成,根据三维图的简化来建立有限元模型图,并在ANSYS中对鞍体模型进行有自由网格划分,鞍体网格划分见图7:

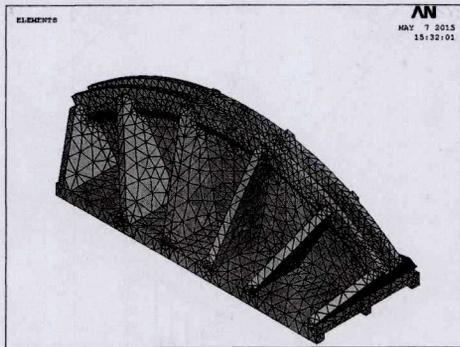


图7 鞍体网格划分图

5.2 鞍体有限元分析的过程及结果

5.2.1 对鞍体进行建模分析,见表1

表1 模态分析参数设置表

弹性模量	泊松比	材料密度	模态提取阶数	分析方法	载荷
2.02GPa	0.3	7.80g/cm ³	10	Block Lanczos	4500kN

5.2.2 模型的约束及载荷的施加

在模型中对鞍体与滚轴接触的底面进行约束,并在鞍槽底面施加载荷见图8。

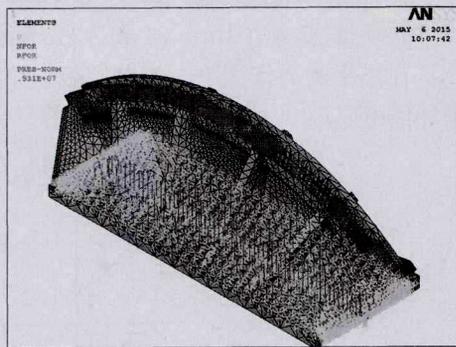


图8 鞍体有限元模型荷载施加图

5.2.3 鞍体的应力情况分析

查看有限元结果,得到鞍体有限元模型的应力云图,如图9所示,

由应力云图的数据可得出关于鞍体的应力情况,见表2所示:

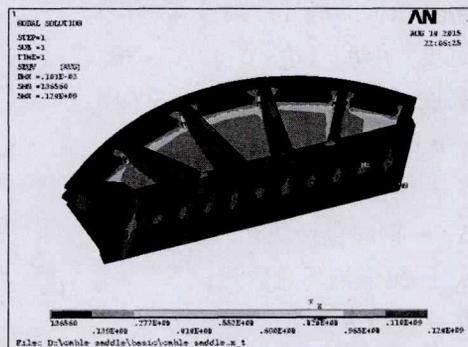
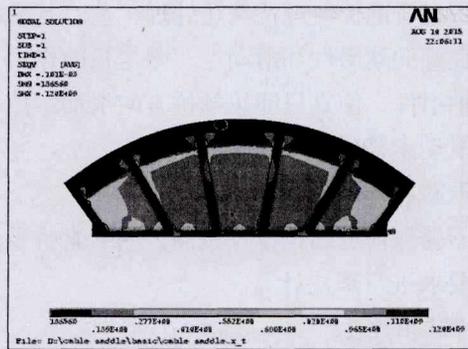


图9 鞍体应力云图

表2 鞍体有限元分析应力情况(加载4500kN)

鞍体结构位置	应力(MPa)	备注
鞍槽处	31.5	大部分应力<10MPa,局部最大应力31.5MPa
竖筋板处	56.6	最大应力56.6MPa
加强筋板处	13.6	大部分应力13.6MPa,局部最大应力27.7MPa
滚轴与鞍体接触处	124	大部分应力55MPa左右,局部最大应力124MPa

5.2.4 鞍体的变形情况分析

查看有限元结果,得到鞍体总位移变形图见图10,由图可得到最大位移变形量为0.0358mm、位移变形最大处在索槽弧顶处。

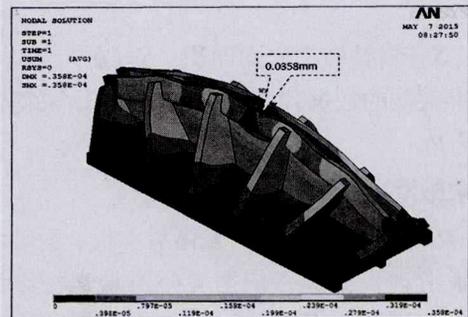


图10 鞍体总位移变形图

(下转第31页)

结果如下：止浆袋的浆体容易从止浆环与钢绞线、注浆管的缝隙溢出，无法使止浆袋膨胀，达不到止浆的效果。同时，取消内部止浆结构也不利于止浆器的定位。

2. 外部止浆是止浆器的关键和难点；

(1) 止浆袋材料必须能满足足够的耐磨和耐压要求；

(2) 止浆袋不易过厚，过厚会影响其与止浆环的绑扎效果；

(3) 止浆袋缝合要满足足够的强度；

(4) 绑扎槽在止浆环径向尺寸允许的条件下，优先选用矩形槽+V型槽的结构。

3. 充浆式止浆器在岩土工程应用中的优势：

(1) 成本经济性良好；

(2) 安装、使用操作简便；

(3) 结构安全可靠；

(4) 适用性好；

(5) 止浆压力高，可大于3.5MPa以上；

(6) 止浆器注浆与锚索孔道注浆分别使用单独的注浆管，注浆互不干涉，保证施工更安全可靠。

(7) 止浆孔径大（本文为 $\phi 220\text{mm}$ ），可根据实际需要设计。

6 结论

从南宁市五象新区核心区商务街项目应用效果来看，充浆式止浆器能够满足大孔位，高止浆压力要求，且具有安装简便、结构安全可靠、适用性广、节省工程成本等优点，适合在类似工程项目中大批量推广使用。

参考文献

- [1] 闫莫明, 徐祯祥, 苏字约. 岩土锚固技术手册. 人民交通出版社, 2004年4月.
- [2] 李伟, 孙永洁, 朱天琴等. 布袋式充浆止浆环在预应力锚索施工中的运用. 人民黄河第31卷第4期, 2009年4月.

（上接第26页）

5.3 鞍体的有限元分析小结

(1) 在静态下将拉索力转化成对鞍体的强度计算，通过鞍体的分析，得到鞍体在最大拉力（4500kN）工况下的结构变形、应力分布规律：

鞍槽处最大应力31.5MPa，竖筋板处最大应力56.6MPa，鞍体滑动面与滚轴接触处最大应力为124MPa；

(2) 鞍体为ZG270-480H整体铸造，其材料的屈服强度标准值为270MPa，有限元分析的最大应力少于材料的屈服强度；

(3) 鞍体的滑动面与滚轴接触处为镶嵌的40Cr耐磨板，其材料的屈服强度标准值为690MPa，有限元力分析的最大应力少于材料的屈服强度。

6 结论

(1) 通过索鞍的理论计算和鞍体的ANSYS有限元分析，鞍体各处的应力均小于材料的许用应力，证实滑动索鞍的结构设计是安全可靠的，能满足桥梁寿命设计的要求；

(2) 有限元分析结果显示：索鞍的最大应力集中在鞍体滑动面与滚轴接触处，验证了鞍体镶嵌40Cr耐磨板的必要性和合理性。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. GB 50017-2003钢结构设计规范[S]. 北京：中国计划出版社, 2003.10.
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG D64-2015公路钢结构桥梁设计规范[M]. 中交公路规划设计院有限公司, 2015年.
- [3] 中华人民共和国交通部. JTG-T D65-05-2015公路悬索桥设计规范[M]. 中交公路规划设计院有限公司, 2015年.
- [4] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 3版. 北京：机械工业出版社, 2004.8.
- [5] 东明黄河公路大桥改造工程施工图.
- [6] 滕启杰, 张哲, 余报楚, 邱文亮. 万新大桥梁端滑动索鞍设计与受力分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版) 2006年1月.
- [7] 张洪信, 王怀敏, 孟祥踪. ANSYS基础与实例教程[M]. 北京：机械工业出版社, 2013年6月.
- [8] 秦宇. ANSYS基础与实例教程[M]. 北京：化学工业出版社, 2009年.
- [9] 中华人民共和国交通部. JT-T903-2014悬索桥索鞍索夹[M]. 中交公路规划设计院有限公司, 2014年.
- [10] 李明华, 刘海亮等. 武汉市鹦鹉洲长江大桥散索鞍座新型结构设计[J]. 铁道工程学报 2011年7月.