

斜拉扣挂施工索梁锚固区的力学性能分析

段力^{1,2}, 李元松¹, 高学文³

(1. 武汉工程大学 土木与建筑工程学院, 湖北 武汉 430073; 2. 武汉市规划设计有限公司;

3. 中国铁建大桥工程局集团有限公司)

摘要:针对斜拉扣挂法施工中索梁锚固区应力分布复杂的问题,以某自锚式悬索桥为工程背景,整体结构分析确定最不利位置后,基于 Midas/Fea 程序采用空间实体有限元计算模型,对钢箱梁及端部锚固区进行局部计算分析,验算锚固结构的可靠性并得出应力分布规律。结果表明:钢箱梁在最大索力作用下各板件的应力值均满足规范要求,结构处于弹性工作状态。临时斜拉索倾角对锚箱内板件应力的影响不亚于索力,无论是索力还是倾角的改变,锚箱内薄弱点位置自始至终位于底板 N2 与钢箱梁横隔板 N4 交界处,但各项应力值均小于材料的设计强度;锚箱内竖隔板 N1 应力水平较低,可适当增大竖隔板间距来简化锚箱内部构造;位于锚固段混凝土箱梁,斜拉索集中锚固在端部横梁的方式比锚固于箱梁顶板更安全可靠。

关键词: 悬索桥; 索梁锚固; 极限承载力; 有限元分析

斜拉桥索梁锚固区是将斜拉索的索力传递到主梁的重要结构,因其局部区域应力集中、构造复杂,通常是控制斜拉桥箱梁设计的关键部位。

随着桥梁向大跨度、复杂结构的方向不断发展,斜拉索最大设计索力均达到“千吨”级别,如已建成的苏通长江大桥、上海长江大桥等。这也就意味着锚固点处需承受千吨级的集中力,索梁锚固结构如何将千吨级索力安全、可靠传递到主梁结构上,并在设计周期内具有足够的耐久性成为工程设计最为关心的问题。

常用斜拉索梁锚固形式可分为锚箱式、耳板式、锚管式和拉板式。由于锚固区结构受力极其复杂,采用常规的平面模型计算方法远不能适应这种复杂结构的验算要求,需按照空间理论进行分析与计算。该文依托实际工程,借助 Midas/Fea 有限元软件建立空间实体单元模型,针对该桥斜拉扣挂法施工中临时斜拉桥所采取的不同锚固形式,分析锚固区应力分布规律,验算结构的安全性并找出其薄弱点,为设计施工提供参考。

1 工程背景

某大跨度桥梁为双塔三跨双索面自锚式悬索桥,主桥跨径布置为(210+600+210) m,限于桥位所处地形条件的特殊性,借助临时斜拉索悬拼主梁进行后

期自锚式悬索桥施工,这也是斜拉扣挂法在实际工程中的应用。临时斜拉索共 32 对,采用 1 770 MPa 级 $\phi 7$ mm 平行钢丝,平行索面按扇形布置。

临时钢塔由两个塔柱组成,总高度为 42.2 m,宽为 14.7 m。塔柱为箱形断面,平面尺寸为 3 m \times 5.6 m,塔柱之间设置连接系。全桥主梁为钢—混凝土混合梁,边中跨为加劲钢箱梁,梁高 4.5 m,梁宽 22.0 m,索梁锚固形式采用耳板式,共布置 23 对斜拉索;主梁锚固段为混凝土箱梁结构,梁高 4.5~10.3 m,梁宽 18.8~31.3 m。采用锚管穿过横隔梁将余下 9 对散索临时锚固在箱梁端部。大桥桥型布置及横截面图如图 1、2 所示。

2 索梁锚固区力学特性

2.1 临时斜拉桥锚固类型

钢箱梁段采用耳板式锚固(图 3),斜拉索通过销轴与耳板铰接,索力由耳板直接传给腹板。索力传递过程中,主要是通过箱内隔板分散集中力。传力途径:斜拉索→销铰连接件→锚固耳板→锚箱隔板→钢箱梁横隔板→钢箱梁全截面。

混凝土箱梁为锚管式结构(图 4),直接将锚管嵌入混凝土横隔梁,锚管的下端布置加厚锚垫板。索力由锚管向主梁腹板的传递过程中,主要是通过锚垫板

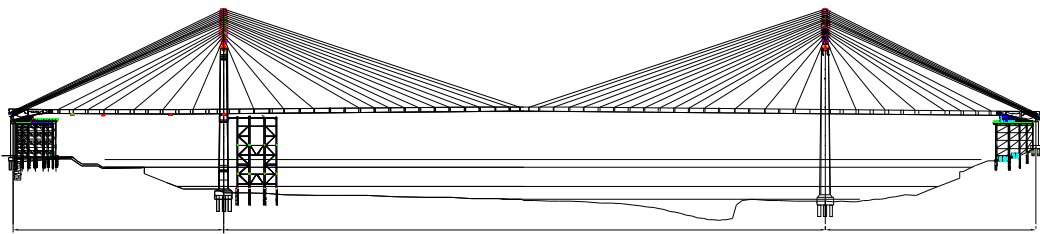


图1 主桥立面布置示意图(单位:mm)

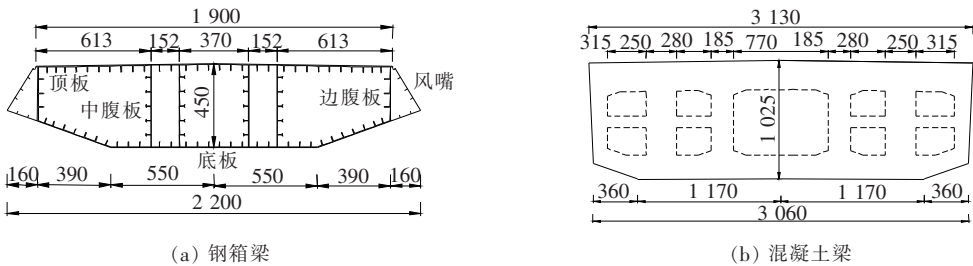


图2 大桥横截面图(单位:cm)

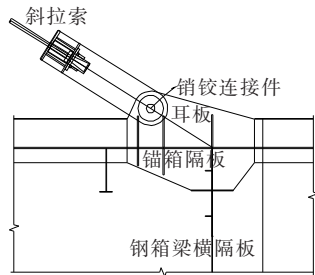


图3 耳板式索梁锚固结构

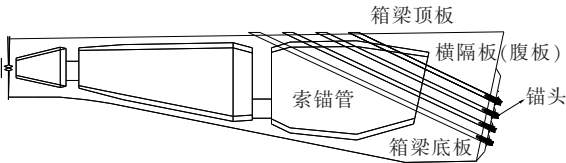


图4 锚管式索梁锚固结构

分散集中力。传力途径:斜拉索→锚垫板→锚管→横隔板→箱梁顶底板、腹板。

2.2 锚固结构的设计原则

索梁锚固结构的设计除了要满足受力合理性外,还需考虑到临时斜拉索的安装、施工期维护检修的便利性 & 后期拆除拉索的可操作性。锚固结构的受力合理性主要体现在两个方面:

(1) 索力传递性能。索梁锚固结构能有效地、顺畅地将索力传递到主梁上,并将集中索力迅速扩散,减少锚固区附加的应力集中现象,尽可能在主梁截面上分布均匀。

(2) 整体受力性能。索梁锚固结构应尽可能减少对加劲梁受力截面的削弱,保证加劲梁及主要受力构

件的连续性和完整性。

3 有限元模型

采用 Midas/Civil 通用软件建立全桥杆系模型,正装计算模拟整个施工过程(图 5)。确定出正常使用极限状态下的每根索力,并取最不利荷载组合下的索力作为索塔模型的计算索力。计算表明跨中 M2[#]、M3[#]、M13[#] 拉索设计索力较大,索力为 6 500~7 000 kN(图 6),需重点关注该索梁锚固位置的受力情况。

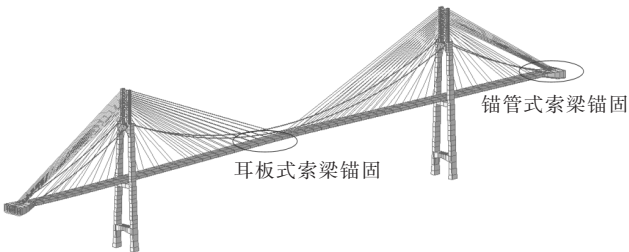


图5 全桥杆系单元模型

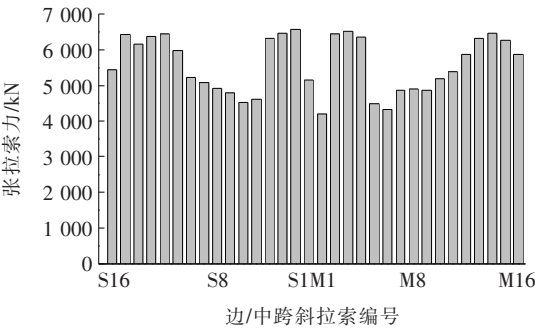


图6 斜拉索索力

采用 Midas/Fea 建立实体单元空间有限元模型, 为保证计算精度, 箱梁内部隔板和相邻腹板采用自由网格划分加密单元。模型 I 钢箱梁部分划分为 140 822 个单元和 144 726 个节点, 模型 II 混凝土箱梁部分划分为 561 699 个单元, 121 155 个节点。

3.1 基本参数及材料特性

钢箱梁选用 Q420 结构钢, 弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3, 重度为 78.5 kN/m³。锚跨段为 C55 混凝土三室箱梁, 弹性模量为 35.3 GPa, 泊松比为 0.2, 重度为 25.5 kN/m³。

3.2 边界条件及加载方式

为减小边界效应对索梁锚固区受力的影响, 主梁前后梁段均多取 5 m。整个模型在顺桥向的两端施加固定约束, 外加荷载考虑了拉索索力、结构自重、施工临时荷载, 设置刚性连接将轴力、弯矩、剪力均匀地施加在刚性块上, 其中将弯矩等效成力偶均匀地施加在刚性块边缘节点上。

耳板式锚固结构中, 销轴在索力作用下与耳板销孔壁密贴, 两者之间高度接触。当 $R_1/R_2 \leq 1.02$ 时 (R_1 为销孔半径, R_2 为销轴半径), 两圆柱体的接触面积急剧增加, 可按平面接触处理, 将索力以节点力或面荷载的方式均匀施加在锚箱销孔和销轴接触区域的半圆弧面上; 混凝土箱梁锚固区锚垫板与承压板采用等效板厚方法处理, 索力以面荷载方式施加。

4 有限元计算及结果分析

4.1 传力路径与薄弱点分析

锚固结构钢材采用的是理想弹塑性本构模型, 屈服准则采用的是 Mises 屈服准则, 由于有限元程序云图显示的节点应力是采用单元积分点应力数值外推获取, 这样可能导致部分节点处应力值偏高。各项应力计算结果见表 1。锚固结构板件编号如图 7 所示。

表 1 1.3 倍设计荷载锚箱各板件应力 MPa

板件名称	主拉应力	主压应力	Mises 应力
耳板及销孔衬套	173.2	145.1	171.5
锚箱竖隔板 N1	136.1	95.9	131.8
锚箱底板 N2	183.3	203.3	251.8
箱梁顶板 N3	143.3	44.1	121.7
箱梁横隔板 N4	256.1	78.5	257.6
纵向加劲肋	187.1	148.7	187.3
最大值	256.1	203.3	257.6

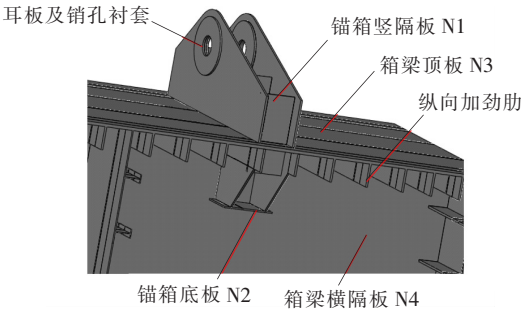


图 7 锚固结构板件编号

由表 1 可得:

(1) 最大索力作用下, 耳板销孔 Mises 等效应力为 171.5 MPa, 等效应力极值出现在销孔两侧, 沿斜拉索方向呈对称分布同时向外围递减。为满足锚固结构的强度要求, 在销轴内外各加了 3 cm 厚衬套来增大承压面积以改善销孔接触面受力状态, 从而降低销孔周边的应力水平。锚箱内多道矩形竖隔板 N1 与钢箱梁顶板 N3 连接。增大接触面的同时保证了箱梁顶板的完整性, 二者应力水平均很低且分布均匀, 最大 Mises 等效应力不超过 140 MPa, 均远小于 Q420 钢材屈服强度, 具有很高的安全储备。

(2) 锚箱内主压应力最大值为 203.3 MPa, 应力集中位置出现在锚箱底板 N2 与横隔板连接处, 底板高应力区域与板件整体尺寸比起来较小, 可以认为板件受力扩散快速、均匀。主梁横隔板 N4 与锚箱底板 N2 接触面的 4 个角点处出现了应力集中, 最大 Mises 等效应力 (257.6 MPa) 与主拉应力 (256.1 MPa) 均出现在该位置。作为锚箱内薄弱位置, 通过局部板件加厚、加大可具有足够的安全储备, 应力沿交界线呈波浪形态逐渐减小, 其分布规律十分明显。

(3) 钢箱梁加劲肋作为防止纵向加劲梁出现面外局部屈曲的构造板件, 其等效应力和纵桥向应力顶底面应力分布和应力值差异不大, 说明加劲肋弯曲变形较小主要处于拉压受力状态, 拉压应力区域传力流畅。加劲肋的应力分布规律呈现两端大中间小, 最大 Mises 等效应力为 187.3 MPa, 安全系数较高, 索力作用下锚箱向外鼓出使顶板发生较大变形, 此时加劲肋发挥了它的作用。

验算表明: 钢箱梁锚固位置各板件 Mises 应力均小于 300 MPa, 满足规范要求且具有足够的安全储备。

4.2 斜拉索倾角及张拉索力的影响

32 对斜拉索中 M2[#]、M3[#]、M13[#] 索力值差异较小, 索力值为 6 500~6 700 kN。下面通过有限元计算分析相同索力作用下, 倾角改变对锚箱板件应力的影

响程度。计算模型分别为:模型1、2:拉索倾角为 20.7° (13#索位置),分别张拉1.2、1.3倍设计索力。模型3、4:拉索倾角分别为 41.6° (3#索位置)、 51.3° (2#索位置),张拉1.3倍设计索力。4个计算模型在索力作用下各项应力计算对比结果如图8~10所示。

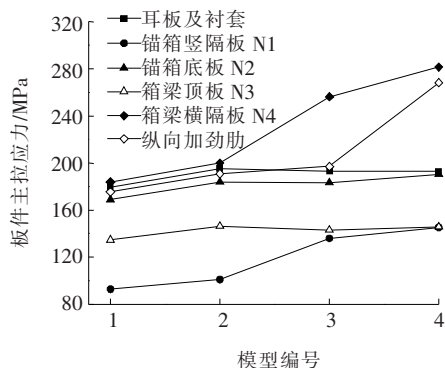


图8 主拉应力对比结果

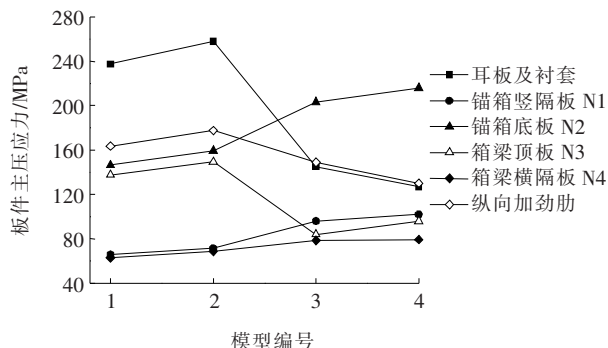


图9 主压应力对比结果

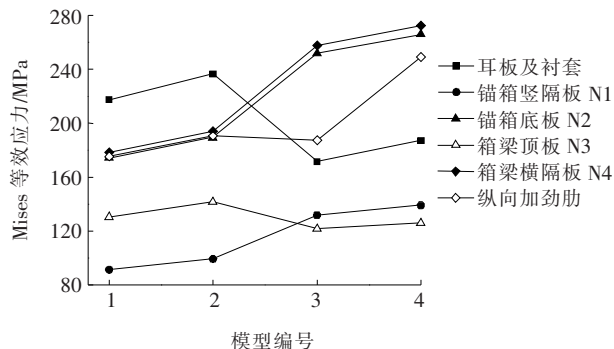


图10 等效应力对比结果

由图8~10可知:

(1) 拉索倾角对锚固区应力的影响程度不亚于斜拉索张拉力,在进行设计时可对锚箱隔板进行特殊处理来适应不同拉索的倾角。分析表明:无论是索力还是拉索倾角的改变,锚箱内薄弱点依然位于底板 N2 与钢箱梁横隔板 N4 交界处,应力值均小于材料的设计强度。

(2) 斜拉索竖向分力随着倾角的增大而增大,同时水平分力逐渐减小。竖向力增大,为抵抗锚箱外鼓纵向加劲肋发挥了很大的作用,应力显著增大。由于锚箱偏心距基本不变,斜拉索水平分力减小,锚箱耳板下缘与主梁顶板 N3 接触面的角点处应力随之减小,耳板最大应力位置又重新回到销孔周围。

(3) 相比之下,锚箱内竖隔板 N1 自始至终应力水平较低,适当增大竖隔板间距来简化锚箱内部构造,既能保证锚箱各板件的应力值在安全范围内,也能减少施工焊缝以及焊接作业的难度。

中间跨斜拉索布置的数量不仅影响张拉力,拉索倾角也随之发生改变。斜拉索布置的数量少,临近跨中倾角小、锚固区集中荷载大,钢箱梁受力状态复杂。斜拉索布置数量多,施工周期长、造价成本高,同时临时钢塔越高越柔,张拉过程中钢塔状态难以控制。

5 临时斜拉索锚固形式

5.1 中跨斜拉索布置方式

主跨 M1~M16 斜拉索及边跨 S1~S7 斜拉索均锚固在钢箱梁上,锚箱设置于钢箱梁大横隔板处。锚固点布置设计考虑因素:除锚固区安全外,应不影响吊索、架梁吊机行走、尽可能减少对主体结构的影响。

设计方案:钢箱梁上布置 23 对斜拉索,拉索倾角为 19.2° ~ 67.8° ,设计索力为 5 000~8 000 kN。经过对钢箱梁横断面的分析研究,防撞护栏底座及相应位置的板件经局部加厚、加大,可作为斜拉索锚固点,锚固点距桥轴线 5.85 m,斜拉索为平行索面。其优势主要有:

(1) 锚固区应力在控制范围内且具有足够的安全储备,保证了施工过程中结构的安全。

(2) 减少对主梁受力截面的削弱,保证加劲梁及主要受力构件的完整性。钢箱梁上不需要另外焊接锚固点,对主体结构的影响降到最低。

(3) 锚固点切割后,可直接作为防撞护栏侧板,避免了对钢箱梁的多次焊接,同时也节省了工程量。

5.2 边跨散索布置位置

边跨 S8~S16 斜拉索锚固在主缆锚固段上,根据主缆锚固段的结构特点、主缆散索布置、斜拉索锚固空间要求等,拟定了两种锚固方案进行比选(图 11),对其进行局部应力分析,选择出合理的锚固方式(表 2)。

经方案比较可得:从施工安全性及经济性方面考虑,方案1只需加强底部支架的布置,不改变主桥结

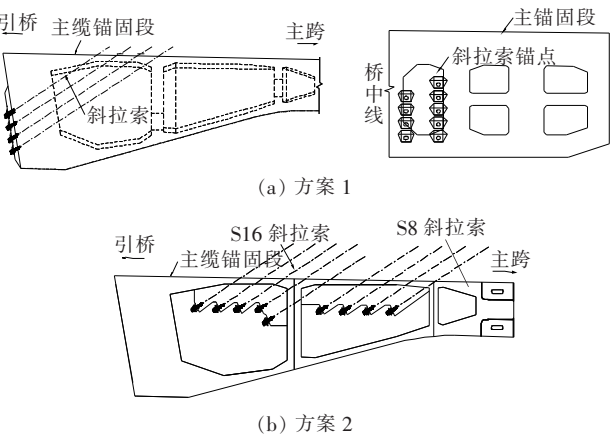


图 11 散索布置方案

表 2 锚固方案比较

锚固方案	锚固形式	优点	缺点
方案 1	集中锚固在横隔梁上	索力传递直接、力线流畅,斜拉索从横隔梁中间穿过,使得拉索索力与腹板平面偏心距小,产生的附加弯矩小	斜拉索力相对于支座的力矩会导致支架前端压力加大,对支架受力情况不利
方案 2	沿纵向分散锚固在顶板上	斜拉索索力分布较均匀,减小支架受到的竖向压力	箱梁顶板应力集中,锚固段应力状况复杂,对主体结构的受力不利

(1) 斜拉索倾角对锚箱内板件应力的影响不亚于索力,无论是索力还是倾角的变化,锚箱内薄弱点位置自始至终位于底板 N2 与钢箱梁横隔板 N4 交界处,应力集中位置最大应力为 281.5 MPa,仍具有足够的安全储备。

(2) 耳板销孔内外布置有 3 cm 厚衬套的局部加强措施,最不利荷载组合对应 Mises 等效应力不超过 240 MPa,大致沿斜拉索方向呈对称分布,耳板应力在传递过程中扩散较快、趋于平均,大部分区域应力为 80~160 MPa;锚箱竖隔板 N1 应力水平较低,可适当增大竖隔板间距简化锚箱内部构造;索力作用下,纵向加劲肋抵抗锚箱鼓出呈现两端应力大中间小,最大 Mises 等效应力为 187.3 MPa。其余各隔板应力水平较低。

(3) 对于锚固段混凝土箱梁,斜拉索锚固于箱梁顶板会出现局部应力超限,采用集中锚固在端部横隔梁的方式更安全可靠。

参考文献:

[1] 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).

构。方案 2 箱梁顶板局部应力超限,应力状况复杂,需对箱梁顶板局部加强处理。综合考虑认为方案 1 更经济可靠,即边跨 S8~S16 斜拉索集中锚固在端部横隔梁上,斜拉索为空间索面。

6 结论

依托斜拉扣挂法施工的实际工程,对临时索梁锚固结构进行有限元计算分析,研究临时锚固结构在最大索力及不同倾角作用下的应力分布规律。计算结果表明:

[2] 刘庆宽,强士中,张强.斜拉桥耳板索梁锚固结构受力特性研究[J].中国公路学报,2002(1).

[3] 白光亮,蒲黔辉.大跨度斜拉桥混凝土索塔钢锚箱空间有限元分析研究[J].公路交通科技,2008(8).

[4] 谭洪涛.松花江公铁两用桥钢箱梁力学性能分析[J].中外公路,2018(6).

[5] 孙亮,王碧波,易伦雄.重庆丰都长江二桥主桥钢箱梁设计[J].钢结构,2012(1).

[6] 高剑,裴岷山.大跨度斜拉桥索梁锚箱空间受力分析[J].建筑科学与工程学报,2006(3).

[7] 葛昆鹏.斜拉桥索梁锚固区局部分析[D].西南交通大学硕士学位论文,2015.

[8] 狄谨,周绪红,游金兰,张茜.钢箱梁斜拉桥索塔锚固区的受力性能[J].中国公路学报,2007(4).

[9] 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).

[10] 肖文勇,余凯.吊耳局部有限元建模技术分析[J].船舶工程,2009(S1).

[11] 颜海,范立础.大跨度斜拉桥索梁锚固中的非线性接触问题[J].中国公路学报,2004(2).

[12] 党栋,贺拴海.异型钢箱混凝土索塔锚固区空间力学行为研究[J].武汉理工大学学报,2012(9).