

高墩多塔预应力混凝土斜拉桥主梁施工关键技术

任雷

(中交第二航务工程局有限公司,湖北 武汉 430012)

摘要:汝郴高速公路赤石特大桥为四塔双索面预应力混凝土斜拉桥,跨径为 $(165+3\times 380+165)$ m,最高主塔 286.63 m,最重梁段 1[#]块方量达 269.2 m³,主梁与地面高差约 185 m。大桥主梁采用多约束条件下 0[#]块施工技术、7 600 kN 承载力超大前支点挂篮施工、边跨无约束合龙技术、中跨次中跨顶推合龙技术、竖直下拉索+TMD 主梁抗风研究 5 个关键技术,解决了大桥超高超重预应力混凝土主梁施工技术难题,可为同类型斜拉桥主梁施工提供参考。

关键词:高墩多塔斜拉桥;超高超重预应力混凝土结构;0[#]块施工;前支点挂篮;合龙技术;竖直下拉索;TMD

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

1 工程概况

赤石特大桥是厦门至成都高速公路汝城至郴州段控制性工程,主桥为跨径 $(165+3\times 380+165)$ m 四塔预应力混凝土双索面斜拉桥,边塔支承、中塔塔梁墩固结体系,索塔为双曲线薄壁收腰造型,最高主塔 286.63 m,为目前世界第一大跨径高墩多塔混凝土斜拉桥^[1-2]。大桥总体布置如图 1 所示。

赤石特大桥主梁采用单箱四室预应力混凝土箱梁,主梁中心高 3.2 m,箱梁顶宽 27.5 m,风嘴部分宽为 2×0.25 m,桥面设 2% 的双向横坡。主梁截面有 3 种形式,其中标准截面顶板、底板、斜腹板厚 0.28 m,

中间腹板厚 0.3 m。主梁标准断面如图 2 所示。单个索塔设 23 对斜拉索,每对斜拉索与主梁相交处均设置横梁,横梁中心处厚 0.35 m,至近拉索区厚度过渡到 0.65 m^[3]。

赤石特大桥单个索塔主梁共分为 25 个节段,其中 1 个 0[#]节段、23 个悬臂节段、1 个合龙节段,如表 1 所示。悬臂节段最重梁段为 1[#]块,方量 269.2 m³,主梁与地面高度差约 185 m,超高超重上构预应力混凝土箱梁施工为赤石特大桥施工关键性工序。

结合大桥主梁结构特点及现场实际地势情况,赤石特大桥主梁采用如下施工工艺:0[#]块采用三角托架现浇、悬臂段 1[#]~23[#]块采用前支点挂篮悬浇,边跨采用无约束合龙技术,中跨、次中跨采用顶推法合龙。

较为有利。

(4) 中边跨主梁吊装推进速度应保持和中边跨标准梁段数的比例一致。

(5) 以上结论也适用于两岸边跨都有吊索的悬索桥主梁吊装顺序确定和优化。

参考文献:

- [1] BROTON D M. A General Computer Program for the Solution of Suspension Bridge Problems[J]. Structural Engineer, 1966, 44(5):161-167.
- [2] 吕建鸣. 大跨度悬索桥施工控制分析[J]. 公路交通科技, 1994, 11(1):33-39.
- [3] 陈彩霞. 悬索桥钢箱加劲梁安装过程及临时连接的研究

[D]. 成都:西南交通大学,2007.

- [4] 姜军,忻刚明,孙胜江. 大跨悬索桥加劲梁吊装阶段的施工控制[J]. 公路,2009,54(12):35-38.
- [5] 常大宝. 泰州长江大桥钢箱梁吊装施工关键技术[J]. 中外公路,2012,32(4):195-199.
- [6] 刘吉喆. 大跨度铁路悬索桥加劲梁施工方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [7] 赵少杰,肖丹,王芝兴,等. 大跨径公路悬索桥拆除施工及监控关键技术研究[J]. 中外公路,2017,37(1):163-166.
- [8] 姜宏维,郭建明. 大跨度悬索桥鞍座顶推研究[J]. 中外公路,2018,38(1):127-130.
- [9] 范杰. 大跨度非对称悬索桥主缆线形合理施工状态研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

前在梁体上预埋支架拆除吊装孔。

步骤4:安装1#块工况下挂篮挂腿,施工1#块,1#块施工采用挂篮承载,并提前在梁体上预埋支架拆除吊装孔。

步骤5:考虑挂篮前横梁、中横梁与支架之间空隙不足0.5 m,并且前移后需拼装接长挂篮,0#块支架采用二次切割拆除法,即1#块施工完成后,先拆除支架前半部分,待挂篮下放前移并拼装接长后,再拆除支架后半部分。如图4所示,支架采用卷扬机荡移法拆除,由多个卷扬机牵引荡移后转换至塔吊垂直下放,拆除过程需完全避让下塔柱电梯、上塔柱电梯、电梯换乘平台等约束。

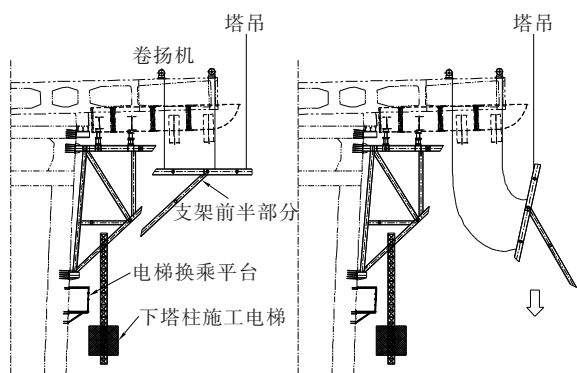


图4 0#块支架前半部分拆除

步骤6:待挂篮下放前移并在0#块支架上完成拼装接长后,同样采用卷扬机荡移法拆除支架后半部分,完成整个0#块支架拆除施工,如图5所示。

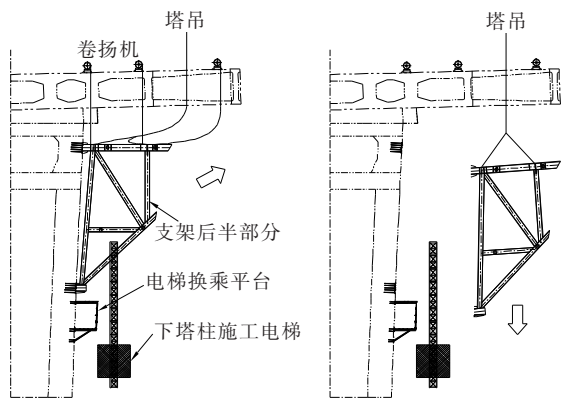


图5 0#块支架后半部分拆除

3 7 600 kN 承载力超大前支点挂篮施工技术

赤石特大桥预应力混凝土主梁采用前支点挂篮悬

浇工艺,考虑主梁1#块为最重梁段,约269.2 m³,挂篮设计为自重2 800 kN、承载力7 600 kN前支点挂篮,见图6。施工期挂篮最大应力250 MPa,挂篮行走工况最大应力0.68 MPa。

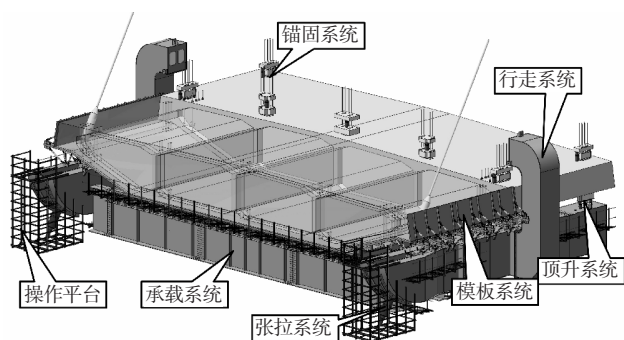


图6 760 t挂篮总体设计

考虑挂篮高空整体提升危险性较大,赤石特大桥挂篮采用0#块支架平台进行散拼。挂篮拼装存在如下难题:

- (1) 挂篮整体长度约18 m,0#块支架长度约15 m,挂篮无法在支架上一次拼装完成。
- (2) 挂篮最大单件质量约13 t,远超过塔吊起重性能,塔吊无法一次吊装到位。
- (3) 挂篮预压吨位达760 t,高空超重预压难度较大。

综合考虑以上难题,赤石特大桥挂篮采用“移动小车+二次接长”工艺安装,即在0#块支架上设置移动小车,挂篮构件在塔吊根部起吊至移动小车后,由移动小车横移至设计位置进行组拼;挂篮第一次仅拼装1#块施工工况的构件,1#块施工完成后,挂篮前移并进行二次接长;挂篮高空预压采用水箱+钢筋原材预压工艺。具体步骤如下:

步骤1:0#块支架安装完成后,在支架上铺设轨道移动小车,小车由H700型钢加工,下设平移、纵移轨道,可实现挂篮拼装过程中构件的平移、纵移(图7)。

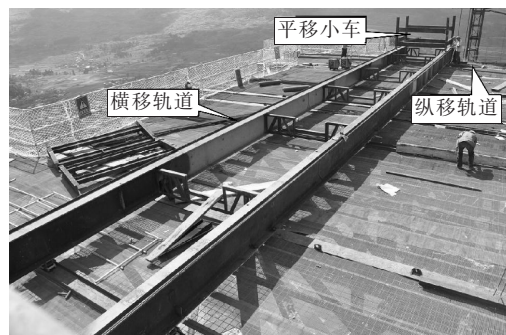


图7 挂篮拼装移动小车

步骤 2:借助移动小车,在塔吊根部拼装挂篮主纵梁 1、前横梁,并实现前横梁整体前移,由于挂篮其他构件均满足塔吊起重要求,1# 块工况下其他构件采用塔吊直接吊装(图 8)。



图 8 1# 块工况下挂篮安装完成

步骤 3:挂篮安装完成后,现场加工预压水箱,采用水箱+钢筋原材预压(图 9)。

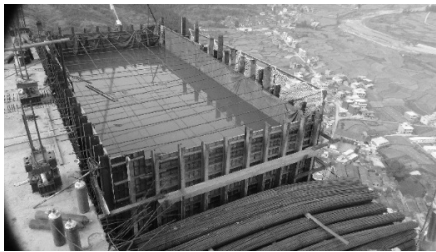


图 9 挂篮水箱+钢筋原材预压

步骤 4:待 1# 块施工完成后,挂篮前移,采用 0# 块支架后半部分拼装挂篮主纵梁接长段及后横梁,完成整个前支点挂篮安装,施工主梁悬臂标准节段。

4 边跨无约束合龙技术

赤石特大桥边跨现浇段即为合龙梁段,长度 2.45 m,位于桥梁过渡墩顶、悬臂段 23# 块前端,现浇段截面尺寸与主梁一致,混凝土方量约 163 m³。

设计工况要求悬浇完成后,直接在过渡墩顶搭设支架进行现浇施工,完成边跨合龙。根据设计及监控分析计算,在斜拉索与梁体温度相差 10℃ 时,现浇段与悬臂段上缘会出现转角位移,同时由于主桥跨径较大,边跨合龙段浇筑后会发生较大收缩徐变,综合以上因素,边跨合龙段接缝处存在开裂风险。为解决以上问题,赤石特大桥边跨合龙段采用无约束合龙技术,即边跨合龙段施工全过程均处于自由状态,避免裂缝的产生,具体措施如下:

(1) 边跨合龙段支架位于过渡墩顶,主要为两层结构,其中下层为横桥向双拼 I36,与过渡墩顶预埋件

焊接牢固,上层为纵桥向 I36,与悬臂段挂篮前横梁焊接牢固,在两层结构中间设置两块四氟滑板,滑板分别与上下层 I36 焊接,滑板间均匀涂抹润滑油,确保施工过程中边跨合龙段处于无约束状态(图 10)。

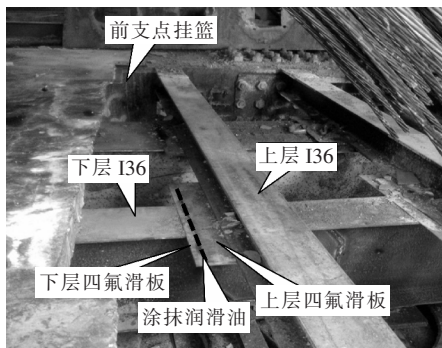


图 10 边跨合龙段无约束支架

(2) 在挂篮前横梁位置增设 6 组锚杆组,锚固于悬臂段 23# 块上,增加边跨合龙段支架承载能力(图 11)。

(3) 施工 23# 块时在对应挂篮主纵梁位置底板埋设 3 组埋件,与纵桥向 I36 焊接牢固,确保梁体、挂篮、上层 I36 为整体,实现边跨合龙段无约束工况(图 11)。

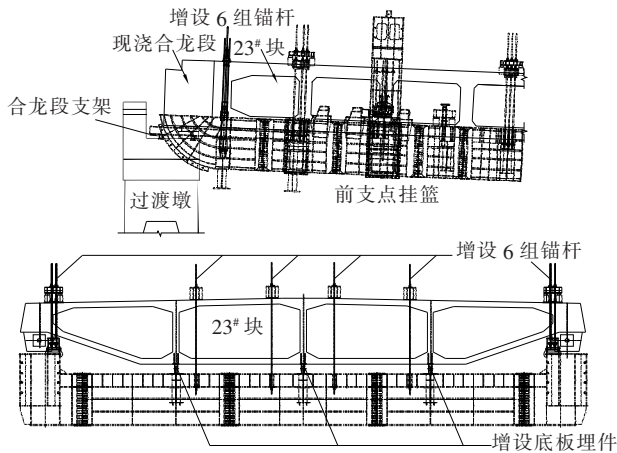


图 11 边跨合龙段支架加强

(4) 在合龙段顶面位置按照 2 m 间距设置纵向 $\phi 16$ mm 精轧螺纹钢,端头模位置设置顶托装置与引桥 T 梁对撑,在合龙段混凝土浇筑完成并达到初凝

后,进行精轧螺纹钢预紧及施加顶托外力。

(5) 为克服主梁发生竖向位移变化,浇筑合龙段前,根据线形监控选择温度较低时对次中跨侧抗风下拉索进行预张拉。

(6) 考虑主梁收缩徐变,根据监控计算,施工时将上支座板向边跨侧移动 5 cm,保证成桥 10 年收缩徐变后支座及梁端里程满足设计及规范要求。

5 中跨、次中跨顶推合龙技术

根据设计及监控计算结果,赤石特大桥成桥 10 年后,因混凝土收缩徐变影响主塔偏位较大,产生塔偏后导致全桥结构受力与设计不符,且影响成桥后线形美观,为了保证赤石特大桥成桥后结构安全及线形要求,

主桥中跨、次中跨采用顶推合龙工艺。根据监控计算,赤石特大桥合龙顺序优化为先边跨合龙,再中跨合龙、最后次中跨合龙,顶推施工预偏方案为:中跨合龙时对合龙口施加 4 000 kN 顶推力,调整 6[#]、7[#] 索塔塔偏,次中跨合龙时对合龙口施加 2 000 kN 顶推力,调整 5[#]、8[#] 索塔塔偏^[6]。

表 2、3 为中跨、次中跨合龙口顶推后塔梁位移变化值。

合龙口顶推采用在梁端风嘴实心段部位预埋施工埋件,埋件上焊接双拼 H588 作为施工千斤顶支撑架,在千斤顶两侧安装 $\phi 325$ mm 无缝钢管作为临时限位,保证顶推过程中主梁结构受力安全。此外,在合龙口两侧主梁上设置 6 组刚性连接,作为顶推施工体系转换结构,其中底板设置 2 组,顶板设置 4 组,如图 12 所示。

表 2 中跨合龙口顶推塔梁位移变化 mm

主梁标高变化				主梁水平位移		6 [#] 塔	7 [#] 塔
6R23	6L23	7L23	7R23	6R23	7L23	塔偏	塔偏
+102	-118.1	+101.2	-118.5	-67.1	+63.8	-120.6	+122.5

注:标高变化:“+”表示上升;“-”表示下降。水平位移和索塔变化:“+”表示向大里程侧移动;“-”表示向小里程侧移动。下同。

表 3 次中跨合龙口顶推塔梁位移变化 mm

主梁标高变化		主梁水平位移		8 [#] 塔	7 [#] 塔
8L23	7R23	8L23	7R23	塔偏	塔偏
-45.2	+0.9	+143.9	-1.5	+124.7	-1.72

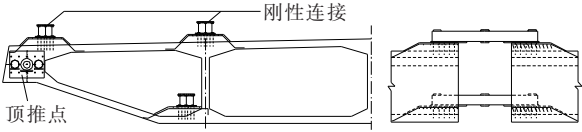


图 12 合龙口顶推及刚性连接

6 竖直下拉索+TMD 主梁抗风技术

赤石特大桥最高主塔 286.63 m,塔顶实测最大瞬时风速超过 32 m/s^[7],约为 11 级台风,桥址处风向复杂,大桥塔高、主梁悬臂长,考虑大桥双悬臂状态结构安全,施工期间需对其开展相应抗风措施研究。经过多轮方案比选,赤石特大桥最终采用“竖直下拉索+TMD”主梁抗风方案,即通过在主梁悬臂侧张拉下拉索以减小主桥施工期竖向风致抖振响应,通过梁端安装 TMD 以减小主桥横向风致抖振响应,从而达到综

合控制的目的,确保桥梁施工安全。

6.1 竖直下拉索

竖直下拉索为主梁悬浇期间布置在主梁上的抗风下拉索,依据桥梁监控数据,在主梁悬浇过程中的各个工况下对下拉索施加或释放拉力,达到主梁竖向抗风效果。赤石特大桥单个悬臂梁段布置两对,全桥共设 16 对,如图 13 所示。

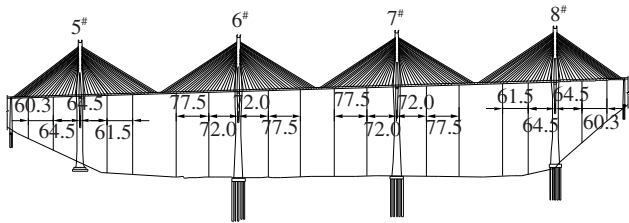


图 13 竖直下拉索布置图(单位:m)

下拉索基础采用两种形式,平地为 4.5 m×4.5 m×4 m 扩大基础,山体侧为长度 10 m $\phi 40$ mm 精轧螺纹钢锚杆。下拉索采用公称直径 $\phi 15.2$ —31 孔环氧涂层钢绞线,抗拉强度为 1 860 MPa,安装采用单根挂索、单根初张拉。

为保证主梁悬浇施工时梁体线形监控数据准确,在主梁立模及斜拉索三张时,必须保证下拉索为无应

力状态,待立模标高调整完成或斜拉索三张完成后,组织人员将下拉索张拉至 100 kN,以保证主梁抗风安全。

6.2 TMD

电涡流调谐质量阻尼器(TMD)是专门为大跨度结构与细高形结构发展起来的一种抗震元件,常用于大型建筑及桥梁结构抗风^[8-10]。根据赤石特大桥低频控制的需要,TMD 设计为单摆式结构,在主梁每个悬臂端各安装 1 台,共 8 台。

TMD 整体外形尺寸为 8 m×10.25 m×14.05 m,总质量约 80 t,主要由支架、质量块、钢索、摆长调节、导向、阻尼、滚轮等部件组成,如图 14 所示。主要特点有:① 可调频率范围为 0.136 8~0.4 Hz;② 阻尼比为 6.09%,最大阻尼系数为 8 000 N·s/m;③ 共 4 个质量块,有效质量 44 t;④ 具有理想的线性黏滞阻尼特性;⑤ 无附加刚度;⑥ 无工作流体,不会出现漏液情况;⑦ 在磁场中工作无需电源。

以 7# 索塔为例,TMD 实施数据如表 4 所示。

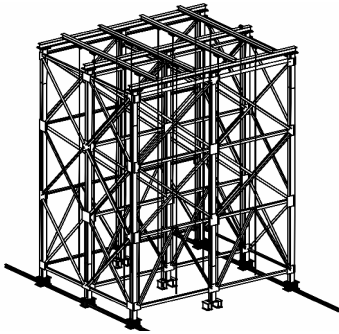


图 14 TMD 设计图

表 4 7# 索塔 TMD 实施数据

挂索 对数	有效质 量/kg	质量 板数	频率/ Hz	阻尼比/ %	摆长/ mm
19	39 252	12	0.170 8	6.09	8 509
20	41 908	13	0.161 5	6.09	9 517
21	41 908	13	0.153 1	6.09	10 590
22	44 564	14	0.145 3	6.09	11 758
23	44 564	14	0.138 2	6.09	12 997

赤石特大桥施工期抗风采用“竖直下拉索+TMD”方案,主梁整体竖摆频率提高 50% 以上,横摆模态固有阻尼比提高 2.9% 以上,抗风效果明显。

7 结论

赤石特大桥主梁采用前支点挂篮施工,对 0# 块支架设计安装、前支点挂篮施工、边跨无约束合龙、中跨次中跨顶推合龙、施工期间抗风研究等关键技术问题进行研究,较好地解决了超高超重预应力混凝土梁施工难题,得出以下结论:

- (1) 主梁 0# 块支架采用单片安装、二次切割拆除,实现多约束条件下 0# 块施工。
- (2) 悬臂段采用承载力 7 600 kN 超大前支点挂篮悬浇,挂篮采用移动小车+二次接长工艺安装、水箱+钢筋原材预压工艺,实现了大桥超高超重主梁悬浇。
- (3) 大桥边跨现浇段即为合龙梁段,采用滑移式支撑并增设相应加强措施,实现了边跨无约束合龙。
- (4) 优化合龙顺序:先边跨、后中跨、最后次中跨合龙,并采取中跨、次中跨顶推合龙。
- (5) 为减小主梁悬浇施工期间风致抖振,大桥采用“竖直下拉索+TMD”抗风技术,抗风效果明显。

参考文献:

[1] 苏满阳,康厚军,丛云跃,等.不同斜拉索模型对多塔斜拉桥力学性能的影响[J].公路工程,2017,42(2):42-46.

[2] 庞杰,康厚军,王晚华,等.多塔斜拉桥中的共振模式研究[J].公路工程,2017,42(2):56-62.

[3] 潘传宗,任雷.单箱多室现浇箱梁模板整体吊装工艺设计与施工[J].施工技术,2018,47(S4):426-429.

[4] 杨培诚,陈卡拉.赤石特大桥双面双曲线形主塔施工技术[J].中外公路,2013,33(5):146-148.

[5] 龚美,董乐安,吴明威,等.多约束条件下大桥 0 号块支架安拆技术[J].中国港湾建设,2017,37(9):66-69.

[6] 江雄.赤石特大桥主梁合龙方案研究[J].桥梁建设,2016,46(1):117-121.

[7] 官成,刘志文,谢钢,等.高墩大跨斜拉桥悬臂施工期风致振动控制[J].工程力学,2015,32(S1):122-128.

[8] 尹学军,张宝才,沙曾.调谐质量减振器(TMD)在桥梁振动控制措施的理论与应用[C].第十届全国噪声与振动控制工程学术会议论文集,2005.

[9] 陈政清,黄智文,王建辉,等.桥梁用 TMD 的基本要求与电涡流 TMD[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(8):6-10.

[10] 张鸣祥,王建国,汪权.大跨度桥梁多模态耦合颤振的 TMD 控制[J].计算力学学报,2012,29(3):315-320.