

山区钢桁架悬索桥设计与施工

杨胜, 樊小伟

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要:巴东清江特大桥位于湖北省恩施水布垭镇,主桥跨径为420 m,主桥采用钢桁架悬索桥。主缆中心距离13.3 m,宽跨比为1/31.6,主缆索夹内直径为387.4 mm,索夹外直径为392.2 mm。主梁钢桁架采用华伦式,桁高3.6 m,桁宽13.3 m,节段吊装长度12.0 m。锚碇均采用隧道式锚碇,隧道锚长度通过缩尺模型试验确定。钢桁架采用杆件运输到现场后,拼装为整节段,主梁采用跨缆吊机带梁行走方式整节段吊装。

关键词:钢桁架悬索桥;设计;施工;试验

1 工程概况

巴东清江特大桥位于湖北省恩施州巴东县水布垭镇,是鄂西山区修建的又一座大跨径桥梁,是湖北省道巴(东)鹤(峰)公路的控制性工程(图1),主桥跨径420 m,采用单跨双铰钢桁架悬索桥。



图1 巴东清江特大桥实景图

巴东清江特大桥位于水布垭大坝上游,直线距离约1.8 km。桥位处地形为“V”字形峡谷,起终点岸坡度分别为 50° 、 40° ,起点岸坡高程为420~480 m,终点岸坡平台高程为390 m左右,河床高程为190~210 m,地貌形态属于剥蚀中山区峡谷地貌河谷地带。

大桥设计采用双向两车道,主桥两侧设置人行道,桥梁宽度为12 m。桥梁设计车速为40 km/h,设计荷载:公路—Ⅰ级,人群荷载为 2.5 kN/m^2 。巴东清江特大桥通航等级为规划内河Ⅲ(1)级航道,最高通航水位为398.22 m,双向通航孔净宽210 m,净高10 m。设计风速:桥面设计基准风速为 31.0 m/s ,地震烈度Ⅵ度。

2 大桥总体布置

巴东清江特大桥总体布置为 $(2 \times 25 + 420 + 3 \times 25) \text{ m}$,桥梁全长565 m,主桥采用420 m单跨双铰钢桁架悬索桥,主缆垂跨比为1/9.6,主缆横向间距为13.3 m,边散索点至塔中心线120 m。桥梁宽度:2 m人行道+8 m车行道+2 m人行道。桥塔采用混凝土主塔,主塔高101.5 m。桥梁总体布置立面见图2。

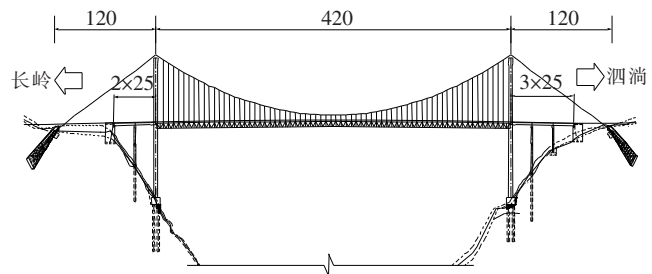


图2 巴东清江大桥总体布置立面示意图(单位:m)

3 主桥结构设计

3.1 主梁

主桥钢桁梁由主桁架、上平联、下平联、横向桁架组成。主桁架采用华伦式,桁高3.6 m(上下弦杆中心距),桁宽13.3 m,小节间长度6.0 m,标准吊装节段长度12.0 m,每6 m设置横向桁架。上、下平联采用K形体系。主桁架弦杆、横梁桁架弦杆采用箱形截面,

腹杆及平联采用工字形截面,主梁构造布置示意图见图 3。

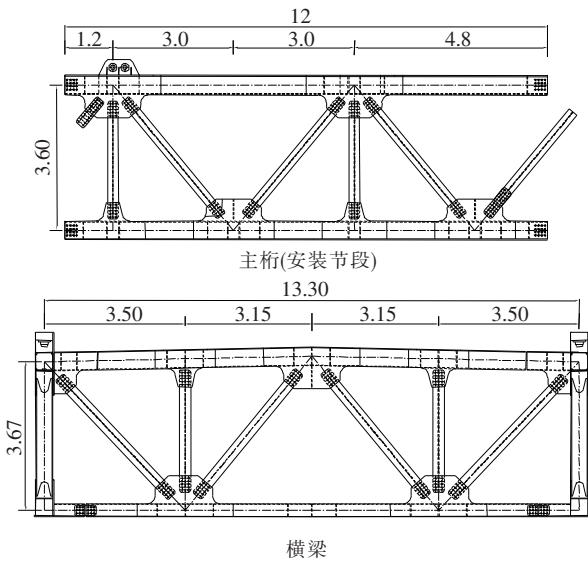


图 3 主梁构造布置示意图(单位:m)

主梁在桥塔横梁处设置两个双向移动的拉压竖向支座,该支座不仅承受主梁反力,还能有效约束梁端扭转位移。在加劲梁两端各设置 4 个水平支座,水平支座不对恒载及汽车荷载发挥作用,仅用于横向抗风及横向抗震功能。

为提高抗震性能,在主桥顺桥向两侧桥塔横梁处设置高阻尼装置——黏滞阻尼器,以增加结构的阻尼耗能能力,降低地震响应,控制主梁位移,避免在地震力作用下相邻构件之间的碰撞。每塔设置 2 组,全桥共设置 4 组。阻尼器与主塔、主梁的连接见图 4。

3.2 桥面系

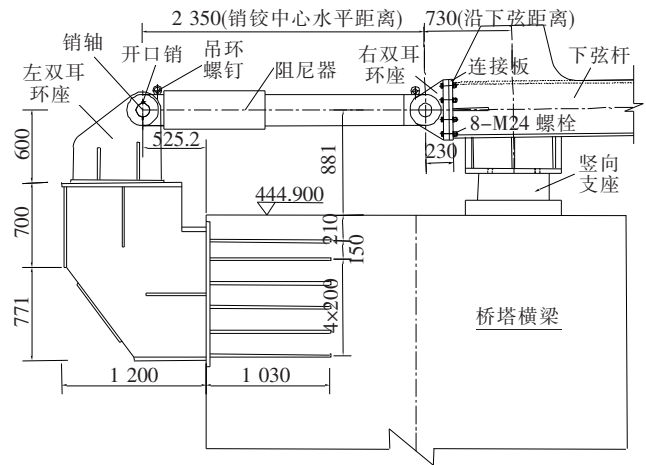
桥面板采用 C40 钢筋混凝土实心板,纵向板长 6 m,横向 4 块,每块预制板宽 2.55 m。采用预制吊装,预制板之间采用 60 cm 湿接缝连成整体。

3.3 桥塔

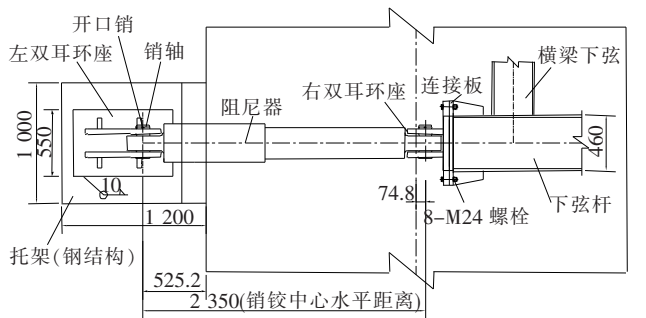
桥塔为主塔柱、上横梁、下横梁组成的门形框架结构;桥塔主塔柱、上横梁、下横梁均采用空心矩形截面。塔柱底标高为 395.500 m,塔高为 101.5 m。桥塔基础采用 8 根 $\phi 2.5$ m 钻孔灌注桩群桩基础。承台采用矩形承台,承台厚 5.0 m。

3.4 主缆及吊杆

主缆采用 1/9.6 的垂跨比,中跨主缆计算跨径 420 m,边跨主缆计算跨径 120 m。主缆横桥向间距 13.3 m,主缆共计 52 束索股,单索股为 $91\phi 5.1$ mm 高强钢丝,主缆架设时为正六边形,紧缆后为圆形,索



(a) 阻尼器立面布置图



(b) 阻尼器平面布置图

图 4 阻尼器与主塔、主梁的连接图(单位:mm)

夹内空隙率为 18%,索夹外空隙率为 20%,索夹内直径为 387.4 mm,索夹外直径为 392.2 mm。

吊索采用高强度镀锌钢丝平行集束为索体的单吊索,吊索分为 61 丝 $\phi 5.1$ mm 镀锌高强钢丝和 73 丝 $\phi 5.1$ mm 镀锌高强钢丝。

3.5 索鞍、索夹

主索鞍采用纵、横肋间接传力方式设计,索鞍由座体、底座、拉杆、锌填块、隔板、螺栓等部件组成。座体采用铸焊结合型结构,分为上下两部分。上部为铸造鞍头,其顶部为鞍槽;下部为鞍身,由竖向纵肋板、向心状竖向横肋板、水平横肋板、座体底板、上承板、不锈钢滑板及侧肋板等组焊形成。主索鞍施工预偏 63.2 cm。主索鞍、散索鞍构造示意图 5。

散索鞍采用摆轴式结构,由鞍头、座体、底座、压紧梁、拉杆、锌填块、隔板、螺栓、垫板、上下摆轴、锥形销、密封条等部件组成。鞍槽采用铸钢铸造,鞍体上部由钢板焊成、底部为锻钢件,鞍槽、鞍体上下部通过焊接连为一体。

索夹采用上下两半对合式索夹,该桥索夹共 3 大类:① 位于中跨区、用于连接主缆与吊索的吊索索夹;

② 位于边跨、用于主缆定型的紧箍索夹;③ 位于塔顶主索鞍出口处及锚碇锚室出口处防护密封的密闭索夹。

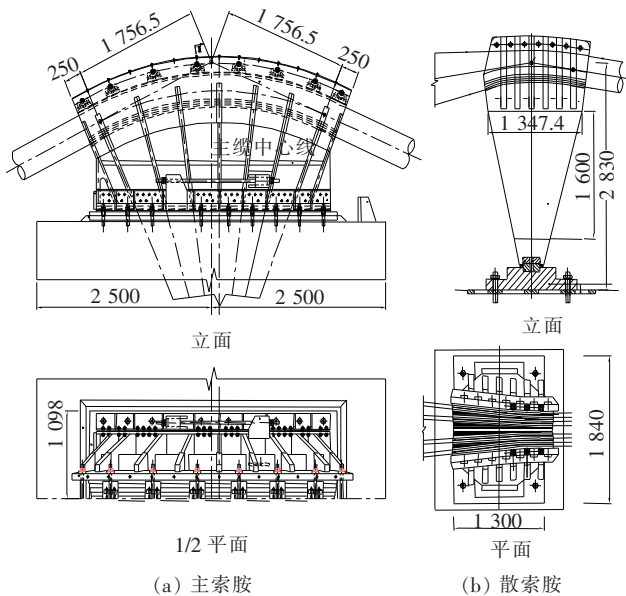


图5 主索鞍、散索鞍构造图(单位:mm)

3.6 锚碇

两岸锚碇均采用隧道式锚碇,隧道锚的采用降低了工程造价。锚塞体为变截面楔形棱体,长岭岸锚体长度为18 m,泗淌岸锚体长度为15 m,后锚室长度均为2.2 m;前锚面均为7.0 m×7.6 m(宽×高),顶部为圆弧形,圆弧半径3.5 m;后锚面长岭岸为8.2 m×11.08 m(宽×高)、泗淌岸为8.0 m×10.5 m(宽×高),顶部圆弧半径为4.1 m。

4 主要结构计算

4.1 有限元模型

采用通用有限元程序 Midas/Civil 建立全桥模型(采用桥梁结构非线性分析系统 BNLAS 复核算),全桥共划分为3 306个单元,1 545个节点。有限元模型如图6所示。

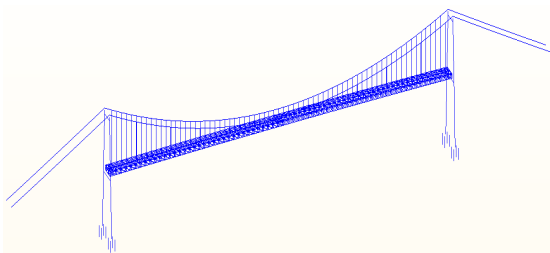


图6 全桥有限元模型

4.2 设计荷载

设计荷载参数取值:① 混凝土重度 26.0 kN/m^3 ,钢材重度 78.5 kN/m^3 ,沥青重度 24.0 kN/m^3 ;② 整体升降温按 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 计;③ 运营风荷载风速 $V_d = 25 \text{ m/s}$;④ 支座沉降按 0.5 cm (桩基位于中风化灰岩)计;⑤ 人群荷载标准值为 2.5 kN/m^2 ;⑥ 车辆荷载为公路—I级。

4.3 主缆及吊杆应力

根据有限元计算结果,主缆标准组合最大应力为 626.1 MPa ,安全系数为2.67,吊杆标准组合最大应力为 532.0 MPa ,安全系数为3.14。

4.4 主梁应力

主梁运营阶段主要组合应力如表1所示。

表1 标准组合主梁最大应力汇总

杆件	主梁最大应力/MPa		
	组合1	组合2	
主桁架	上弦杆	109.1	151.8
	腹板	135.2	148.1
	下弦杆	135.9	183.8
横桁架	上弦杆	106.9	115.8
	腹板	116.8	118.4
	下弦杆	113.1	122.4
平联	上平联	60.5	79.2
	下平联	67.3	83.3

注:组合1=恒载+沉降+汽车+人群;组合2=恒载+沉降+汽车+人群+温度+横风。

4.5 抗风颤振稳定计算

根据《清江特大桥桥位气候背景和风参数专题研究报告》,地表粗糙度属于D类,风剖面指数为0.3,桥面高度处的设计基准风速为: $V_d = 31 \text{ m/s}$;根据JTG/T D60-01-2004《公路桥梁抗风设计规范》的规定,桥梁的颤振检验风速为: $[V_{cr}] = 1.2 \times 1.4 \times 31 = 52.08 \text{ m/s}$ 。采用Midas/Civil有限元程序建立模型,进行特征值分析。

按规范公式计算颤振稳定指数为: $I_f = 7.6 > 7.5$,需要进行风洞试验以检验颤振的稳定性。该桥进行节段模型风洞试验,根据试验结果,采取在桥面中央横梁下设置中央稳定板的抗风构造措施,颤振临界风速高于颤振检验风速,抗风稳定满足要求。

5 主要施工流程

5.1 主桥主要施工流程

主塔、索道锚施工→吊装鞍座→架设导索→安装猫道→安装主缆索股→紧缆及安装索夹→吊杆安装→吊装节段钢桁梁→吊装预制桥面板→桥面附属设备施工。

5.2 主梁吊装施工

钢桁梁吊装时以先吊装的两岸 B1 和 B1' 梁段为后续梁段的起吊平台,其他梁段采用跨缆吊机运输起吊。跨缆吊机带梁行走方式整节段吊装钢桁架梁的新技术,克服了无垂直吊装钢桁梁条件下采用杆件吊装的缺陷,简化了工艺,节省了场地和工期,降低了造价。跨缆吊机带梁行走吊装主梁如图 7 所示。



图 7 跨缆吊机带梁行走吊装主梁照片

6 主要科研试验

该桥虽然在悬索桥中为中小跨径,但是桥梁宽跨比较小,山区峡谷风较大,施工条件较差,设计施工难度与千米级悬索桥相差不多,为保证桥梁安全,在设计施工中进行的主要科研试验如下:

(1) 为了确定桥位区风参数,设计阶段进行了桥位气候背景和风参数专题研究,确定了桥位区风参数。

(2) 为了确定该桥的抗风性能,设计阶段对该桥进行了节段模型风洞试验,经济合理地确定该桥抗风构造措施。

(3) 为了验证锚塞体与岩体的整体效应,采用隧

道锚缩尺模型试验,以验证锚塞体尺寸的合理性。

(4) 为了保证桥梁运营安全,成桥后对主桥进行了车载试验,通过应力及线形的检测结果反馈,主桥成桥状态与设计吻合度良好。

7 结语

巴东清江特大桥是鄂西山区成功建设的一座中等跨度悬索桥。山区低等级公路上建设悬索桥,由于大节段运输困难,常采用钢桁架主梁,钢桁架主梁可以化整为零,采用杆件运输到现场,再用高强螺栓拼装为节段,解决了运输问题;同时通过降低吊装节段重量,采用跨缆吊机带梁行走方式整节段吊装钢桁架梁的新技术为主梁吊装提供了新的选择。目前该桥已完成交工验收,结束了巴东水布垭镇清江两岸以船代渡的历史,方便了百姓出行。该桥的建设造就了“绿水、青山、大坝、大桥”浑然一体的立体景观,长岭岸设置观景平台方便游客观赏,带动了当地旅游业发展。

参考文献:

- [1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 清江特大桥施工图[Z],2014.
- [2] 二航院,长江科学院. 大跨度悬索桥隧洞锚岩石力学关键技术及应用[Z],2016.
- [3] 西南交通大学风工程试验研究中心. 清江特大桥抗风性能研究[R],2014.
- [4] 重庆交通大学. 清江特大桥初步设计方案抗风稳定性计算[Z],2013.
- [5] 杨胜,樊小伟. 窄悬索桥加劲梁选型[J]. 城市道桥与防洪,2014(6).
- [6] 孟凡超. 悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [7] JTJ 025—86 公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].
- [8] JTG/T D60—01—2004 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [9] 彭元诚. 四渡河特大桥设计[C]. 中交 2010 年现场技术交流会议论文集,2010.
- [10] 徐欣,刘琪,彭元诚. 白洋长江公路大桥钢桁加劲梁设计[J]. 中外公路,2020(1).
- [11] 张伟,唐贺强,宁伯伟. 吉林市雾凇大桥混凝土土 m 锚式悬索桥设计[J]. 桥梁建设,2011(3).