

复杂地质条件下山区悬索桥锚碇选型及设计

陈永亮¹,何世永^{2,3*},夏支贤¹,武文祥¹

(1.云南省交通规划设计研究院有限公司,云南昆明 650041;2.省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室,重庆市 400074;3.重庆交通大学,重庆市 400074)

摘要:由于设计、施工的复杂性,大跨独塔悬索桥在实际工程中鲜有应用。虎跳峡金沙江大桥主桥采用766 m的单跨独塔钢桁梁悬索桥,受地质构造作用,丽江岸锚碇区地质条件异常复杂,同时规划电站的蓄水位导致水文条件不利于锚室防水及锚固系统的耐久性,锚碇选型难度大。因此,该文首先详细阐述复杂地质条件下的锚碇选型;然后介绍锚碇结构设计及高强钢拉杆锚固系统设计;最后列出锚碇计算的主要步骤及重要成果。

关键词:悬索桥;锚碇选型;复杂地质条件;高强钢拉杆;锚固系统

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

0 引言

中国独塔悬索桥的应用多见于自锚式^[1],地锚式独塔悬索桥的工程案例鲜有报道,目前中国只有3座:西藏通麦大桥,主跨256 m,单塔单跨钢桁梁地锚悬索桥;云南香丽高速公路虎跳峡金沙江大桥,主跨766 m,单跨独塔钢桁梁悬索桥;云南玉楚高速公路绿汁江大桥,主跨780 m,单跨独塔钢桁梁悬索桥。其中后两座桥的结构体系相同,在无塔岸设置隧道锚,主缆通过复合索鞍转向锚固于山体中。

随着中国经济高速发展,对高等级公路运营的舒适性要求越来越高,路线的平纵指标也随之提高。体现到山区选线中,跨越山谷的桥梁线位标高比以往更高,桥梁跨径更大。于是各种桥型中跨越能力最强的悬索桥在云南山区得到了广泛应用。从保腾高速公路龙江大桥开始,云南省已设计了5座山区大跨径悬索桥,其锚碇类型见表1。锚碇是将巨大的主缆拉力传递给地基的关键构件,采用何种结构形式与建设条件密切相关。

龙江大桥、涛源金沙江大桥和江底河大桥两岸锚碇区地形较平缓、土层和强风化岩层较厚,故两岸

表1 云南省5座山区大跨径悬索桥锚碇类型

桥名	主跨/m	小里程岸	大里程岸
龙江大桥	1 196	重力锚	重力锚
虎跳峡金沙江大桥	766	隧道锚	重力锚
金安金沙江大桥	1 386	隧道锚	隧道锚
涛源金沙江大桥	636	重力锚	重力锚
江底河大桥	920	重力锚	重力锚

均采用重力锚;金安金沙江大桥两岸锚碇区地形陡峻,基岩较完整,故两岸均采用隧道锚,锚塞体位于Ⅲ级围岩。情况特殊的是虎跳峡金沙江大桥。小里程(香格里拉)岸地形陡峻,基岩完整,可以采用隧道锚,而大里程(丽江)岸的地质条件非常复杂,对锚碇选型是极大的挑战。

本文以虎跳峡金沙江大桥丽江岸锚碇为例,首先详细阐述了复杂地质条件下山区悬索桥锚碇选型的决策过程,然后介绍了锚碇结构设计及计算,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

虎跳峡金沙江大桥是香丽高速公路投资费用最高、跨度最大、施工工期最长的桥梁。在初步设计阶段对各桥型方案进行比选,推荐悬索桥方案,经审

收稿日期:2022-06-20(修改稿)

基金项目:省部共建山区桥梁与隧道工程国家重点实验室(重庆交通大学)开放基金项目(编号:CQSLBF-Y15-13)

作者简介:陈永亮,男,博士,正高级工程师.E-mail:chenyongliangkm@qq.com

*通信作者:何世永,男,博士,副教授.E-mail:he-sy@hotmail.com

查,同意主桥采用 766 m 的单跨独塔钢桁梁悬索桥方案。主桥的跨径组成为 (766+160) m,由锚碇、索塔、索鞍、缆索和钢桁梁等分项工程组成。丽江岸引

桥采用 6×41 m 钢-混组合梁。根据地形、地质条件,香格里拉岸采用隧道式锚碇,丽江岸采用重力式锚碇。虎跳峡金沙江大桥总体布置图见图 1。

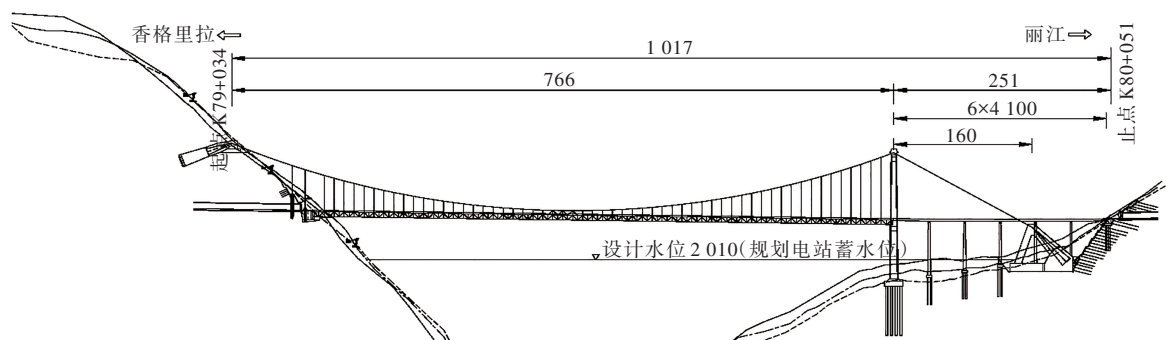


图1 虎跳峡金沙江大桥总体布置(单位:m)

2 丽江岸锚碇区地质概况

桥区主要地质构造为断层,其次为各类结构面,如片理、劈理、节理等,这些大小不一各级结构面控制着河流岸坡的稳定性,对岩体工程性质有重要影响。其中影响丽江岸锚碇的是中落鱼断层。

中落鱼断层为非活动断层,和金沙江斜交。丽江岸大桥锚碇基础处于该断层附近,大桥锚碇基础应加强相应结构措施处理。

丽江岸重力锚基坑开挖后,基底底板以下绝大部分区域为板岩岩层,中线右侧基底区板岩以中风化状为主,岩质较硬、岩体相对较完整、承载力较高、岩体压缩模量较大,中线左侧基底区浅部板岩以强风化为主,岩质较硬、岩体较破碎、承载力稍低、岩体压缩模量稍大;而地势较低的锚前左侧边缘区表土层较厚、基岩埋深较大,基底层有0~7.5 m不等厚的较松散碎石土层、承载力较低、压缩模量较低。从基底地基承载力判定,锚前左角点及左边缘低洼带的碎石土层承载力(280 kPa)远低于设计要求,不能作为锚碇基底持力层,需要清除后采用C30混凝土换填至基岩。丽江岸锚碇区中线处地质纵断面见图2。

3 丽江岸锚碇结构选型

隧道式锚碇根植于基岩,可充分发挥岩石岩性,以其开挖量小、造价低、利于环境保护等优点,成为山区悬索桥锚碇的首选形式。丽江岸锚碇区由于在中落鱼断层附近,受断层影响,岩体片理及次生节理

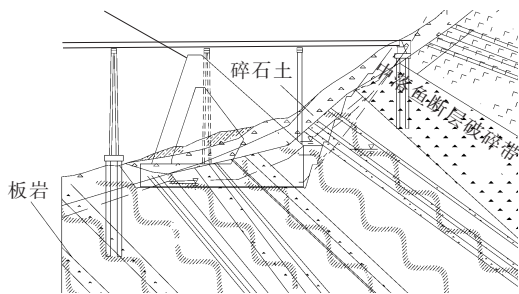


图2 丽江岸锚碇区地质纵断面

发育,岩体破碎,不能承受较大拉应力及剪切应力,设计中提出了重力锚方案和隧道锚方案进行比选,根据地勘资料计算隧道锚锚塞体长度超过70 m,总长超过90 m。上盘的隧道锚边跨270 m,布置在路面以下,隧道锚与断层夹角较小,锚塞体穿入断层,持力层较差。下盘的隧道锚边跨210 m,布置在路面以下,隧道锚与断层夹角较小,锚塞体完全位于断层以下,锚塞体方向为相对远离断层方向,持力层相对较好。两个隧道锚方案中,锚于下盘的隧道锚更占优势。

断层下盘隧道锚与重力锚比较如下:

(1) 从结构安全性来说,重力锚设计施工经验丰富,由于其基底面积巨大,对基底持力层的围岩质量、抗剪断参数、破碎程度、承载力以及参数可靠性的要求相对较低,在断层附近较为复杂的地质条件下安全性高于隧道锚。

(2) 从工程数量来说,隧道锚由于边跨相对较长,主缆用量稍多于重力锚,但混凝土方量仅为重力锚的一半,挖方也远少于重力锚。

(3) 从水文条件来说,受断层影响,该区域岩层裂隙发育,地下水丰富,且隧道锚部分前锚室、锚塞体及后锚室均位于电站蓄水位2010 m以下,运营期间前、

后锚室内渗水可能性大,对索股耐久性极为不利。

综合比较,隧道锚经济性和环保性能优于重力锚,但锚于断层周围破碎岩体中仍存在极大安全风险。重力式锚碇适应性较强,传力机理简单,主要通过锚碇自身重力和地基摩擦力承担主缆缆力^[2]。故推荐重力锚。

4 丽江岸重力锚设计

4.1 锚体结构

重力锚由基础、锚块、锚室、散索鞍支墩4部分构

成。锚块承受通过锚固系统传递的主缆索力,散索鞍支墩承受通过散索鞍传递的压力,锚室保护主缆索股,基础为明挖扩大基础。锚碇总体布置见图3,锚碇立面构造见图4。

前锚室、散索鞍支墩采用C40混凝土,基础、锚块采用C30混凝土,后浇段采用C30微膨胀混凝土。电站蓄水位为2 010 m,考虑3 m高度的富余量,标高2 013 m以下混凝土均采用P12防渗混凝土,以上采用P8防渗混凝土。

散索鞍支墩为空心薄壁结构,顺桥向为等截面单箱单室,横桥向为变截面单箱双室,墩顶设置5 m

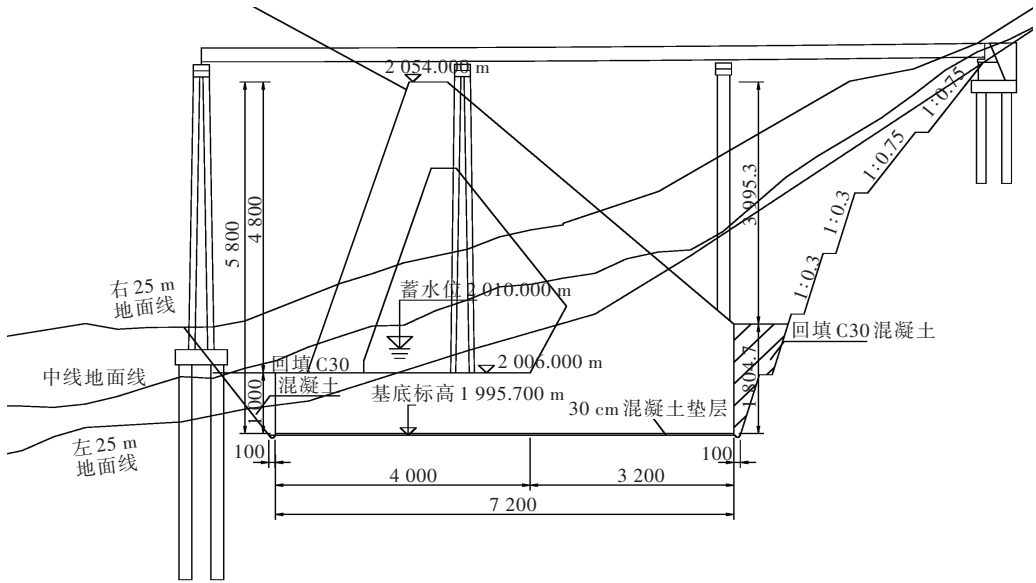


图3 锚碇总体布置(单位:cm)

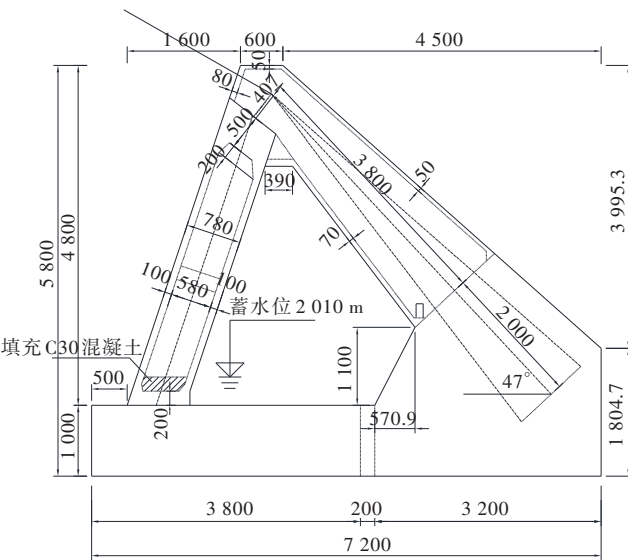


图4 锚碇立面构造(单位:cm)

厚实心段,墩底设置2 m厚度的实心段。基础及锚块

横桥向宽度为50 m。由于锚碇平面尺寸较大,为避免锚块和基础浇筑施工后出现收缩与温度裂缝,锚块和基础分成4块进行浇筑,各块之间设置了2 m宽的微膨胀混凝土后浇带。

4.2 高强钢拉杆锚固系统

悬索桥锚碇锚固系统主要分为型钢锚固系统和预应力锚固系统两种类型。悬索桥主缆采用预应力锚固系统的工程远远多于采用型钢锚固系统的工程,中国修建的主跨超过800 m的悬索桥主缆大部分都采用了预应力锚固系统^[3]。预应力锚固系统具有施工方便、造价经济等优势,故丽江岸锚碇也采用预应力锚固体系。

预应力锚固体系又可分为钢绞线和钢拉杆两种。刚性拉杆锚固系统与传统的预应力锚固系统相比,其耐腐蚀性能好,可降低施工控制难度,近几年

在中国悬索桥锚碇锚固系统中开始得到应用^[4]。由图 4 可知:钢绞线锚固系统的后锚室位于电站蓄水位之下,即使采取了防水措施,钢绞线锚固系统的耐久性风险依然很高。因此,丽江岸锚碇采用了高强钢拉杆锚固系统,优势为:取消后锚室,彻底解决后锚室的积水难题;单根钢拉杆面积大,对表面腐蚀不敏感。

高强钢拉杆锚固系统在型钢锚固系统的基础上发展而来,由两个子系统组成:① 索股锚固系统;② 钢拉杆系统,两子系统通过连接器结为统一整体,主缆索股拉力通过连接器平板转换为钢拉杆拉力,钢拉杆拉力通过钢垫板直接传给锚块混凝土。

索股锚固系统由连接拉杆组件、连接器平板组成;索股锚固连接构造分为单索股锚固单元和双索股锚固单元,单索股锚固单元由两根连接拉杆和单索股连接器平板构成,双索股锚固单元由 4 根连接拉杆和双索股连接器平板构成。钢拉杆系统由锚固钢拉杆、后端锚固承压螺母、前端转换螺母等构成;锚固钢拉杆采用表面涂抹水溶性防锈油+孔道灌注纯水泥浆的防腐体系。

连接拉杆直径为 75 mm,锚固钢拉杆直径分别为 90 mm 及 130 mm。锚固钢拉杆由两根高强钢拉杆通过连接套接长。锚固钢拉杆、连接套采用 40CrNiMo,连接拉杆采用 42CrMo,连接平板和连接筒采用 45 号钢。

每根主缆包含 97 股通长索股,此外在丽江岸边跨设置两根背索,在塔顶主索鞍锚固。由 127 根直径 5.3 mm、抗拉强度 1 770 MPa 的镀锌钢丝组成一根索股。前锚面布置见图 5。

5 锚碇结构计算

5.1 地基承载力验算

基底应力计算公式为: $\sigma = N/A \pm (M \times y)/I$,其中 N 为轴力; M 为轴力对底面中心的弯矩; A 为底面面积; I 为底面惯性矩; y 为基底应力计算点(图 6)到底面中心的距离。分块施工期间分别以锚块和支墩基础底面中心为中性轴,计算基底应力,后浇段完成后,锚碇形成整体,以整个锚碇的底面中心为中性轴计算基底应力,然后按照基底位置进行应力叠加。

正常使用工况:工况 1:点 a 、 b 之间的支墩基础及点 c 、 d 之间的锚块分别浇筑完成;工况 2:浇筑后浇段,形成整体,施加恒载缆力;工况 3:常荷载最大缆力。

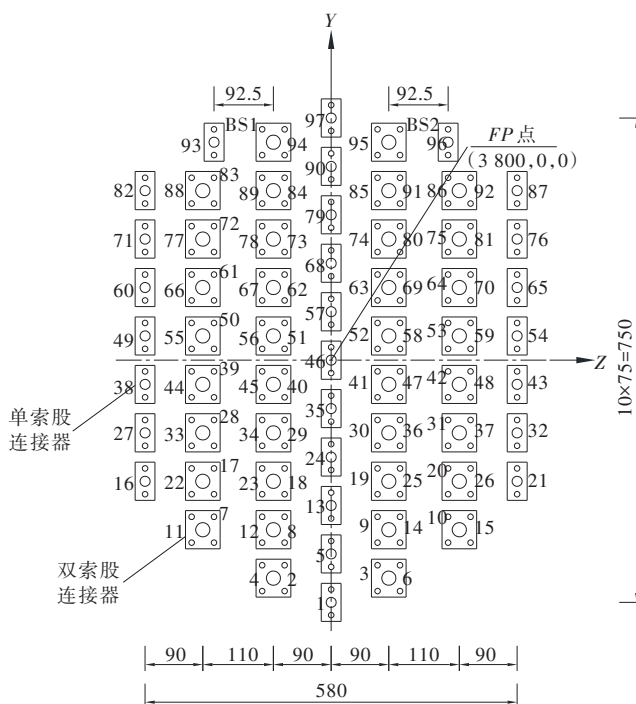


图 5 前锚面布置(单位:cm)

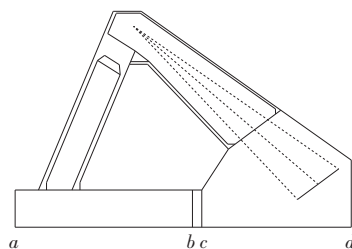


图 6 锚碇基底应力计算点位置

地震力工况(工况 4):水平向前地震力+竖向向下地震力+(地震组合缆力)(对应 a 点最大应力)。

各点的应力计算结果见表 2。

根据地质报告,锚碇基础底面大部分位于强风化板岩及中风化板岩,地基容许承载力分别为 $[f_{a0}] = 550$ kPa 及 1 100 kPa。地震力组合时容许承载力提高 50%。由表 2 可知:大部分地基承载力验算满足要求,只有锚前点 a 的压应力略超过允许值(如考虑深宽修正,则地基承载力满足要求)。设计要求开挖到锚碇基础标高时,再确定是否进行地基处理。根据重力锚开挖至基底在锚前左侧区域做的相关岩土力学试验初步成果,重力锚锚前左侧地基的岩土力学性能不能满足设计要求,需要将重力锚锚前左侧区域的基底换填至中风化板岩标高。为准确判断重力锚锚前左侧区域中风化板岩的标高,现场在该区域补钻了两个地质钻孔。换填以后,经过原位试验验证,基底承载力满足设计要求。

表2 各工况下锚底各点压应力

工况	锚底各点压应力/kPa			
	锚前点a	鞍部前点b	鞍部后点c	锚后点d
1	240.0	240.0	493.0	641
2	592.0	234.0	468.0	315
3	633.0	224.0	456.0	260
施工阶段容许应力	687.5	687.5	687.5	1 375
常荷载容许应力	550.0	550.0	550.0	1 100
4	920.0	355.0	578.0	100
地震荷载容许应力	825.0	825.0	825.0	1 650

5.2 抗滑稳定性验算

考虑以下两种工况:① 最大缆力(蓄水位以下考虑100%浮力);② 水平向前地震力+竖向向上地震力+地震组合缆力。

考虑基底摩擦力,同时计入抗剪断强度,则抗滑稳定系数 K 计算式为:

$$K=\frac{G\cdot f'+c'\cdot A}{P}$$

式中: f' 为接触面抗剪断摩擦系数; c' 为接触面抗剪断黏聚力(kPa); A 为接触面积(m^2); P 为主缆的水平分力(kN); G 为锚碇重力(kN)。

根据《重力式锚碇基础岩土体力学试验成果报告》,地基岩体的板岩区,混凝土-岩界面自然剪切时黏聚力 c' 为468~496 kPa,饱和摩擦时黏聚力 c' 为256~536 kPa^[5],偏保守计算,取 $c'=256$ kPa。混凝土-岩界面自然剪切摩擦系数 f' 为0.62~0.715,饱和摩擦系数 f' 为0.59~0.62^[5],偏保守计算,取 $f'=0.59$ 。抗滑稳定性计算结果见表3。

表3 丽江岸锚碇抗滑稳定性计算结果

工况	计算安全系数	规范要求	结论
①	4.08	≥ 2.0	满足
②	1.51	≥ 1.2	满足

5.3 锚体应力计算

由图5可知:散索鞍支墩顶部和前锚室相连的区域构造复杂,且支墩顶面直接承受散索鞍传递的巨大缆力,所以有必要进行实体有限元分析,查明该区域的应力分布情况。

对丽江岸锚碇散索鞍支墩和前锚室采用Midas/FEA进行实体建模分析,根据对称性横桥向取1/2锚

碇进行模拟,共计120 000个单元。计算荷载考虑了自重、人群荷载和索鞍底支撑力,人群荷载取 1.5 kN/m^2 ,索鞍底支撑力取63 200 kN。边界条件为前锚室底部固结,散索鞍支墩底部固结。

由计算可知:① 主拉应力:三角撑最大主拉应力为1.6 MPa,散索鞍支墩实体块底部最大主拉应力为2.5 MPa,前锚室底板过渡区最大主拉应力为1.9 MPa。设计对上述区域的钢筋进行了加强;② 主压应力:最大主压应力出现在散索鞍底部对应的支墩顶面,为8.51 MPa,C40混凝土抗压强度设计值 f_{cd} 为18.4 MPa,主压应力满足规范要求。

6 结语

由于地质构造作用,虎跳峡金沙江大桥丽江岸的锚碇区地质情况非常复杂,采用何种锚碇形式需要经过全方位的对比研究。尽管隧道锚的工程量小于重力锚,但由于存在不确定性,所以最终选择了更稳妥的重力锚。若复杂地层下的锚塞体受力机理和锚固系统耐久性取得突破,将拓展隧道锚的应用空间,大大降低山区悬索桥的造价。

本文从锚碇结构选型、锚碇设计、计算,详细介绍了丽江岸锚碇的设计过程及成果,可以为同类建设条件下的山区悬索桥锚碇设计提供参考。虎跳峡金沙江大桥已于2020年底建成,成为横跨金沙江的美丽风景。

参考文献:

[1] 杜鑫,李杰,杨纪,等.某独塔自锚式悬索桥吊杆锚固区细部应力分析[J].中外公路,2021,41(2):164-167.
[2] 中交公路规划设计院有限公司.公路悬索桥设计规范:JTG/T D65-05—2015[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
[3] 苏强,王强,曾诚,等.我国悬索桥主缆预应力锚固系统设计探讨[C]//第十六届全国混凝土及预应力混凝土学术会议暨第十二届预应力学术交流会论文集,2013:432-437.
[4] 鲁薇薇.悬索桥主缆锚固连接器疲劳性能试验研究[J].中外公路,2022,42(2):112-116.
[5] 余美万,郭喜峰.重力式锚碇基础岩土体力学试验成果报告[R].武汉:长江水利委员会长江科学院,2017.