

云南金安金沙江大桥桥位选择及方案设计

陈军刚¹, 陈孔令¹, 李志厚¹, 吴华金²

(1.云南省交通规划设计研究院有限公司, 云南 昆明 650041; 2.云南省交通运输厅)

摘要: 金安金沙江大桥是云南省华坪至丽江高速公路跨金沙江段控制性工程, 大桥桥位区河段地形、地质复杂, 桥位、桥轴选择困难。该文旨在对大桥桥位、桥轴、桥型选择过程进行阐述和介绍, 通过沿江 20 km 范围内 4 个桥位、5 条桥轴进行比选, 最终确定 K 线增明桥位、Z3 桥轴为大桥具体桥址, 跨江桥梁方案采用 1 386 m 双塔单跨悬索桥。

关键词: 金安金沙江; 桥位; 桥轴; 桥型; 悬索桥

1 项目概况

华丽高速公路属国家高速公路网 G4216 成都至丽江高速公路华坪至丽江段高速公路, 是云南省高速公路网“三纵三横, 九大通道”中的第一横华坪~丽江~兰坪~六库中的一段, 也是国家高速公路网 G42 上海至成都高速公路成都至丽江联络线(G4216)的一段, 项目全长 158.172 km。金安金沙江大桥位于 K114+695 处, 为跨越金沙江而设, 是整个项目的控制性工程。

2 建设条件

桥址区位于丽江市东偏南约 20 km, 金安桥水电站大坝上游 1.38 km 处, 区段内金沙江河谷呈开阔的“V”形, 两岸岸坡均存在陡缓交接的阶梯形特征。华坪岸坡发育多条切割较浅的冲沟, 沟长一般为 1.5~4.5 km, 沟底宽 1~3 m, 沟心基岩裸露, 均为季节性流水冲沟; 岸坡坡度一般为 10°~21°, 局部地形受控于缓倾角发育的凝灰岩夹层及平行和垂直于金沙江的两组节理, 形成局部 20~40 m 陡崖。丽江岸属逆向坡, 受地层岩性、产状、构造等多种因素影响, 丽江岸岸坡地形相较华坪岸明显陡峻, 江边段岸坡的地形坡度一般为 40°~45°, 局部大于 50°, 且存在多处近直立的陡崖地貌; 桥面标高 200 m 以上位置岸坡坡度出现明显转折, 为一宽缓的斜坡地貌。

桥址区及其附近 8 km 范围内规模较大的断裂主

要有 3 条: 三古断裂、楚夺洛一大龙潭断裂、各谷一农旗断裂; 除三古断裂为早中更新世断裂, 其余皆为前第四纪断裂, 桥址区及附近范围无晚更新世以来活动的断裂。区域内地层出露较全, 从震旦系~第四系地层均有分布。震旦系以碳酸盐岩为主, 其次为碎屑岩; 古生界出露齐全, 广布全区, 主要为碳酸盐岩、碎屑沉积岩和基性火山喷出岩; 中生界全区均有分布, 为碳酸盐岩、碎屑沉积岩; 新生界第三系为一套碎屑沉积岩; 第四系主要分布在洼地、缓坡和河谷地带, 成因类型有冲积、洪积、坡积、崩积、湖积和冰碛等, 桥位区不良地质主要包括: 崩塌、滑塌体, 华坪岸为顺层坡, 岸坡稳定问题需重点关注。

桥位地处滇西北横断山纵谷地带, 属低纬高原山地疾风气候, 立体气候特点突出; 全年平均降水量 980 mm 左右, 干湿季分明, 5—10 月雨季总降水量占全年总降水量的 83% 左右。多年统计年平均气温为 16.9℃, 月平均最高气温为 23.8℃, 月平均最低气温为 7.7℃, 极端最高温为 35.6℃, 极端最低温为 -6℃。无霜期为每年 3—11 月; 最大冻土深度 39 cm。桥位河谷区冬季最多风向为偏西风, 频率为 26%; 夏季最多风向为东南风, 频率为 15%; 全年平均最多风向为偏西风, 频率为 18%。

3 主要技术标准

- (1) 道路等级: 双向四车道高速公路。
- (2) 计算行车速度: 80 km/h。
- (3) 标准路基宽度: 24.5 m。

收稿日期: 2019-04-30

作者简介: 陈军刚, 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: 28600598@qq.com

(4) 主桥桁宽:27 m,在满足 24.5 m 路基宽的基础上,两边增设 0.6 m 宽检修道。

(5) 桥梁设计荷载:公路—Ⅰ级。

(6) 桥面横坡:2.0%。

(7) 设计洪水频率:1/300。

(8) 设计基本风速:27.2 m/s。

(9) 抗震烈度:8 度。桥梁设计按专项评测地震动参数研究结果控制结构抗震,100 年超越概率 10%(0.28g)和 4%(0.45g)两水准控制设计。

4 桥位、桥轴选择

4.1 桥位选择主要考虑因素

华丽高速跨金沙江桥位选择时,主要考虑如下因素:

(1) 跨江位置应在两岸接线主要控制点和走廊带上下游一定范围内。

若桥位距离两岸接线控制点太远,展线过长,则不具现实意义。

(2) 桥位与丽江坝区距离近、高差大、地形复杂,跨江桥面标高不宜过小。

金沙江距丽江坝区直线距离不足 20 km,丽江坝区地面高程约 2 400 m,桥位区金安水电站常水位仅 1 418 m,区段路线短、高差大,此为控制设计之一。其次,丽江岸地形陡变起伏大,该岸接线方案以长 25 km 的长坡隧道群为主,按规范要求,“长大坡+隧道群”组合设计纵坡须控制在 3%以内(或取值更缓)方合规、安全。在满足功能、安全、规定指标前提下,如何取得两者之间的平衡成为确定跨江桥梁标高的控制因素。

(3) 区域地震烈度高,索结构下塔柱高度需控制在一定范围内。

桥址地处 8 度高地地震烈度区,桥塔控制设计由地震荷载工况决定,在钢塔使用受限情况下(河谷区地形复杂,进场、现场拼装条件均不支持钢塔方案),桥梁下塔柱高度不宜太高。资料显示中国国内混凝土桥塔悬索桥下塔柱最高者为贵州坝陵河大桥,下塔柱高 91.3 m,但其地震动峰值加速度仅为 0.05g;国外 0.3g 以上地区下塔柱较高者以明石海峡桥(下塔柱高 65.5 m)、南北备赞濑户桥(下塔柱高 62.45 m)颇具代表,但其桥塔又均为钢塔。结合同处高地地震烈度区的云南龙江桥(0.3g 地区,下塔柱高度分别为 51.8 和 11.8 m),该桥下塔柱高度宜控制在 70 m 以内。

(4) 桥梁规模宜尽量小,以减少桥梁建设难度。

该桥对应路基宽仅 24.5 m,各桥位布孔方案最小跨径达 1 200 m,最大者超过 1 500 m;桥梁宽跨比小,对于抗风效果较差的钢桁加劲梁方案(钢桁梁抗风效果差于钢箱梁,但该桥进场、场拼条件均不支持钢箱加劲梁方案),具有跨径大、宽跨小的特点,其设计难度将面临诸多专项挑战。以明石海峡大桥为例,1 991 m 跨径,35.5 m 梁宽,跨宽比为 56;但其所用钢板为屈服强度 700 MPa 的 HT780 钢材,而当下中国国内广泛采用的钢材也仅以 Q420 钢材为主;经过类比分析后,该桥若在满足基本跨越前提下,主跨以不大于 1 400 m 为宜。

4.2 桥位选择

以桥位选择主要考虑因素为基础,沿两岸接线走廊带附近河谷上下游 20 km 范围内进行桥位甄选,由上游至下游方向考察桥位依次为:D5 线三古桥位、推荐 K 线增明桥位、D4 线中台桥位、D7/D8 线永安桥位;各桥位路线平面分布示意图 1 所示。

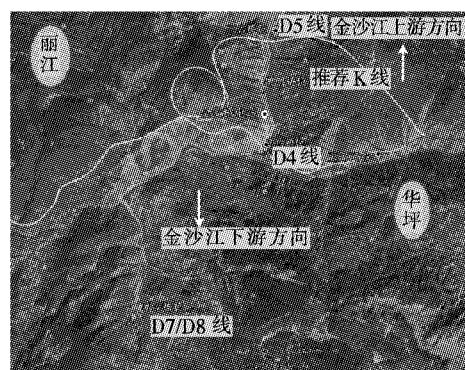


图 1 桥位路线平面分布图

各桥位区河谷两岸地形均呈开阔“V”形,桥梁跨径对桥面高度变化敏感。考虑到各桥位最小跨越距离已达 1 200 m,故桥位论证时,跨江桥梁均按悬索桥方案进行,各桥位方案主要特点如表 1 所示。

由表 1 可知:K 线增明桥位无论从地形、地质、桥梁规模、两岸接线和场地条件等方面均较适中,可实施性强;由此,选定增明桥位为跨江桥位。

4.3 桥轴选择

桥位确定以后,结合桥位区地形、地质情况,对 5 条不同桥轴进行了筛选和论证;其平面位置如图 2 所示(由上游至下游方向:依次为 Z1~Z5 桥轴)。其中,华坪岸坡面有一崩塌堆积体(此崩塌体系金安桥水电站修建和运营过程中发现,现依然处于监测当中),其影响范围如图 2 所示。

表 1 不同桥位主桥主要参数及特点

项目	D5 线(三古桥位)	K 线(增明桥位)	D4 线(中台桥位)	D7/D8 线(永安桥位)
桥位区河谷	相对顺直	顺直	拐角处	顺直
主桥跨径	1 560 m	1 386 m	1 200 m	1 200 m
桥面至江面高	447 m	342 m	388 m	458 m
地形	华坪岸 地形陡,锚洞位于隧道上方	地形较开阔,利于布设	地形横坡陡(锚碇布置困难)	锚洞位于隧道之上
	丽江岸 地形陡,锚洞位于隧道上方	桥梁锚洞与公路隧道需合理布设	锚洞位于隧道之上	桥梁布设容易;接线地形复杂,布设难度大
地质条件	华坪岸(该岸位于笄箕湾上游山脊为顺层坡) 侧,顺层坡面稳定性差	存在崩塌和滑塌体,但可避让	存在危岩、落石,桥塔位置山脊呈孤凸之势	存在危岩、落石、崩塌
	丽江岸 桥头处与三古断裂相交	较好	较好	危岩、落石防护面广、难度大(防护高度达 1 230 m);桥塔、锚碇位于岩堆区(厚 5—53 m)
两岸接线特点	华坪岸 接 8 km 隧道	接 7 km 隧道	接线以明线方案通过陡横坡段,落石防护困难	接线长,且需通过冰碛层地段
	丽江岸 接 5 km 隧道	接 2.5 km 隧道	桥头接螺旋隧道,运营安全风险大	接线长/存在螺旋隧道(部分隧道位于岩堆内,成洞困难)
路线总长差	减少 3.253 km	0	里程增加 7.67 km	里程增加 12.446 km
进场条件	华坪岸 差	好	好	较差
	丽江岸 较差	较好	较好	差
施工场地布置	华坪 较差	好	(对五郎河引水隧道及电站之间有一定干扰)差	较好
	丽江 较差	较好	(位于电站管制区)较差	较好
施工干扰及安全	—	—	对电站建筑、道路、电站隧道干扰大	存在沿江公路保通
桥位评价	较差	推荐	差	差

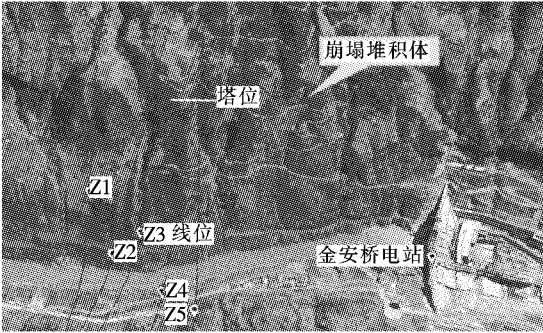


图 2 桥轴选择平面图

项目前期基于地形和地质调绘成果,拟考虑采用

与河谷正交、跨越距离短的 Z1 桥轴为推荐桥轴;该桥轴丽江岸地形(山体相对饱满)、地质(岩体外露)较好;华坪岸桥塔可立于坡面凸起山包之上;该岸锚碇位置基岩出露,地质条件好。随着地勘工作的不断深入,发现该坡面凸包基本由碎石覆盖层(最深达 69 m)构成,“厚覆盖层+顺层坡”的组合使华坪侧岸坡稳定问题异常突出,倘若对华坪岸桥塔位置覆盖层进行清方减载,清方量将达百万方级以上,经济可行性差。

Z2 桥轴、Z3 桥轴考虑利用地形、地质条件较好的丽江岸塔锚位置,对华坪岸塔碇位置进行调整选位(其中:Z2 桥轴桥塔较 Z1 向下游方向移动约 230 m,与 Z1

桥轴夹角约为 8° ; Z3 桥轴桥塔向下游方向移动约 500 m, 与 Z1 桥轴夹角约 15°)。Z2 塔位受限于塔前坡面崩塌临空面, 主桥跨径为 1 380 m; 锚碇位置处有一坡面堆积体(崩积、坡积成因, 其中以松散崩积物为主, 厚度达 42 m, 锚碇位置地质钻探中有缩孔现象), 工程稳定性差。基于此, 对华坪岸塔碇位置继续向下游电站大坝方向移动形成 Z3 桥轴, Z3 桥轴塔和锚碇位置可有效避开坡面上下游侧崩塌临空面, 且锚碇位置坡面覆盖层较薄(厚度小于 14 m), 形成该桥最终选定桥轴。考虑到 Z3 桥轴与河谷非绝对正交(约 15° 斜交), 故有必要在既定华坪岸塔、碇位置情况下, 核实丽江岸有无支承塔锚合理位置之桥轴(桥轴与河谷尽可能正交、减小跨越距离), 由此延伸出 Z4、Z5 桥轴。Z4、Z5 桥轴丽江岸塔位山体两侧河谷侵蚀较深, 山体呈孤凸之势(Z5 桥轴尤甚)、且塔位山体节理发育, 坡面陡峻、工程稳定性差; 基本不具进一步深入研究的价值。

由此得出金安金沙江大桥最终桥轴位置为增明桥位 Z3 桥轴。

5 桥型方案构思与选择

5.1 桥梁选型原则

在桥梁设计中除认真执行“适用、安全、经济、美观”的技术方针外, 该桥设计时还遵守了以下原则。

(1) 因地制宜, 统筹兼顾。结合在“三高地区”建设峡谷悬索桥布跨特点、兼顾路线规划、接线平纵指标、隧道规模等因素, 合理选择桥梁跨径。充分重视桥位既有建设条件(如: 进场道路、场地平整性、水域条件、既有构造物等因素), 选取合理桥梁结构形式及实施方案。

(2) 重视结构耐久性, 可检、可养护维修、可更换。

(3) 充分利用成熟技术, 推动桥梁技术在山区的推广应用。

借鉴国内外大型桥梁设计的成功经验, 尤其是近期修建的山区及长江、海湾特大跨径桥梁的技术经验, 结合该桥条件, 采用成熟可靠的新技术、新工艺, 进一步降低工程规模和风险, 降低造价, 推动桥梁技术在山区的推广应用。

(4) 重视环保、节约, 创优质工程。

(5) 注重景观, 将桥梁结构与环境融合。

(6) 以人为本, 注重人性化设计。

5.2 桥型方案概念设计

根据桥址区地形、地质、线位高度等特点, 可布置

桥型方案主要有悬索桥、斜拉桥、拱桥等大跨结构, 在概念设计阶段, 对以上 3 种桥型均进行了总体布设。

斜拉桥采用主跨 720 m 的钢桁加劲梁方案, 其主要特点为: 桥塔距库区水位线近(库区水环保要求高)、桥塔高、跨径大、丽江岸地形陡峭、出渣难度大; 除设计需面临超高墩、超大跨钢桁斜拉桥的抗风/抗震问题外, 超高塔墩、长悬臂梁结构施工可行性面临的不确定因素亦较多, 总体而言, 斜拉桥方案的可实施性差。

拱桥按上承式布设(拱跨跨径最小), 主桥拱跨达 998 m, 对应拱座处立柱墩高达 172 m。为减少拱上立柱/引桥高墩的数量, 主拱结构与引桥相接处由刚构/T 构与两侧主引桥相连。此方案与中国国内既有大跨拱结构(目前中国国内拱桥结构最大跨径为 552 m 重庆朝天门大桥)相比, 跨径突破过大, 既有设计/施工方面经验少, 不可预知风险因素多。

总体而言: 斜拉桥、拱桥方案均存在一定程度的不确定性、风险较高, 基本不具可行性。相对而言, 悬索桥方案可行性大, 与现场地形、地质条件契合较好, 且悬索桥为柔性结构, 对该桥所处高地震烈度区结构抗震也大有裨益; 因此, 金安金沙江大桥最终采用方案为主跨 1 386 m 的双塔单跨悬索桥方案。

5.3 悬索桥设计概要

金安金沙江大桥采用 1 386 m 单跨钢桁加劲梁悬索桥, 华坪岸引桥采用 3×40 m + 4×36 m 两联预应力混凝土连续 T 梁桥, 丽江岸引桥采用一联 2×30 m 预应力混凝土连续 T 梁桥, 桥梁总长度 1 720 m(图 3)。主桥采用钢桁加劲梁悬索桥结构, 主缆计算跨径为 $(350 + 1\,350 + 360)$ m, 属双塔单跨结构; 主跨跨中设凸形竖曲线, 变坡点前后纵坡分别为 $+1\%$ 、 -1% ; 横桥向设双向 2% 的排水横坡; 桥面标高距桥下水电站库区常水位 334.96 m。

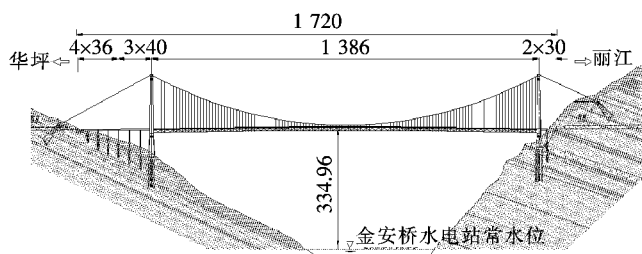


图 3 悬索桥方案布置图(单位:m)

大桥主缆矢跨比(f/l)为 $1/10$, 采用预制平行钢丝索股(PPWS), 两根主缆横向中心间距 27 m, 每根主缆由 169 股索股组成, 每股由 127 根 $\phi 5.25$ mm 的高强镀锌钢丝组成, 钢丝极限抗拉强度 1 770 MPa。

主缆在索夹内外的设计空隙率分别为17%、19%,索夹内外对应缆径分别为844、855 mm。主缆索股锚固系统采用预应力钢绞线与合金钢锚固连接器组合形式,主缆束股经散索鞍散开后,由合金钢锚固连接器连接到锚体内的预应力钢束上。

吊索纵向间距为10.8 m,横向间距为27 m。每一吊点设置两根直径为60 mm的 $8 \times 55\text{WS}+1\text{WR}$ 型钢丝绳,钢丝绳抗拉强度为1 770 MPa,最小破断拉力为2 200 kN。全桥共246个吊点,492根吊索。钢丝绳在主缆处跨越索夹上预留的槽口骑跨在主缆上,下端与钢桁梁销接。

钢桁加劲梁为带竖腹杆的华伦式结构,由主桁架、上下平联、横向桁架组成,杆件均为箱形截面,主桁上、下平联采用X平联。钢桁高8.8 m,桁宽27 m,节间长度10.8 m,在每节间处设置一道横向桁架,全桥共计124个梁段。正交异性钢桥面板由桥面板、U形加劲肋、纵向板肋、横隔梁和倒T形纵梁组成,桥面板厚采用16 mm,U形加劲肋厚度8 mm,桥面铺装采用7 cm厚沥青混凝土。桥面板由6个纵梁支承在加劲桁架上横梁上,纵梁为倒T形,标准段桥面板在顺桥向每隔2.16 m设置一道横隔板,倒T形纵梁与主横桁架上横梁的上翼缘板之间设置拉压式盆式橡胶支座。正交异性钢桥面板在横桥向分为左右两幅。每幅桥面板4个节段作为一联,每联之间设有伸缩缝。桥面防撞护栏采用钢护栏,桥两侧护栏防撞等级为SS级,路中间分隔带处对应为SAm级。

主塔采用门形框架式混凝土索塔,华坪岸塔高205 m,丽江岸塔高191.5 m,每个主塔包含两个塔柱和两道柱间横梁;塔柱为钢筋混凝土结构,为减小主塔风荷载阻力系数,对箱形截面四边角进行切圆处理,上、下横梁均为预应力箱形截面。索塔基础采用群桩基础,每个塔柱下设16根直径2.8 m的钻孔灌注桩。

主索鞍为铸—焊组合式索鞍,鞍槽用铸钢铸造,底座由钢板焊成。为减轻吊装运输重量,将鞍体分成两半,吊至塔顶后用高强度螺栓拼接;半只鞍体吊装重量不超过50 t。鞍体下设不锈钢板—聚四氟乙烯板滑动副,以适应施工中的相对位移;索塔顶设有底座格栅,

以便安装主索鞍。散索鞍同样采用铸焊组合式结构,两岸散索鞍采用摆轴式结构。

两岸锚碇均采用隧道式锚碇。锚固系统采用布设灵活、施工方便的前锚式预应力钢绞线锚固系统。出于可检、可修、可换之目的,锚碇锚固系统钢绞线采用无黏结可更换式环氧喷涂钢绞线。

为减小大桥使用阶段产生过大的变形,对加劲梁在纵、横、竖三个方向建立约束系统。每个桥塔处加劲梁梁端设有两个竖向支座,支座为双向活动支座,全桥共计4个;钢桁梁每端设4个横向抗风支座,全桥共计8个;为减小运营期桥梁振动、减小地震响应,全桥共设有4个纵向液体黏滞阻尼器。

6 结论

云南华丽金安金沙江大桥存在“地形、地质条件复杂、跨径大、下塔柱高、抗震等级高、施工条件复杂”等特点,充分反映了西部高地震烈度、复杂地形山区桥梁之特点,在桥梁选位、选型过程中颇费周折,对该桥进行桥位、方案选择,可得如下结论:

(1) 地形、地质复杂山区大跨桥梁对区域两岸接线布设方案影响较大,须协同综合系统考虑。

(2) 山区大跨结构特征构造物位置影响因素较多,需在充分研究地形、地质基础上作出合理选择。

(3) 山区大跨桥梁选型宜根据功能需要和桥位环境综合确定。该桥位于河谷之间,展示空间有限,桥位方案选择时主要基于公路跨越功能之需要,建议采用技术成熟、设计、施工、管养难度小的技术方案。

参考文献:

- [1] 金增洪.明石海峡大桥简介[J].中外公路,2001(1).
- [2] 陈凯,赵利红,韩艳.山区窄幅悬索桥静风稳定影响参数分析[J].中外公路,2018(3).
- [3] 云南省交通规划设计研究院.金安金沙江大桥初步设计图纸[Z],2014.
- [4] 张晋瑞,李程,胡建华,等.岳阳洞庭湖大桥主桥结构设计与整体分析[J].中外公路,2017(6).