

滇藏高原一座有特色的悬索桥设计

郭晓东 朱栓来

(四川省交通厅公路规划勘察设计研究院 成都 610041)

摘要: 西藏角笼坝大桥是国道214线(滇藏公路)在西藏境内连接西藏芒康县和云南德钦县的一座控制性大桥,是南线入藏的必经之路,战略位置十分重要。大桥主跨为345米的悬索桥,有效地避开了泥石流等不良地质的影响,索塔基础及两岸锚碇均充分利用了基岩,桁架主梁分制造节段和安装节段,兼顾了施工条件和成桥受力。

关键词: 悬索桥 锚碇 索鞍 预应力岩锚

1 概况

西藏角笼坝大桥位于滇藏公路K1845+500米处,北距芒康县城104公里,南距盐井区15公里,距云南省德钦县城128公里。桥址区地处澜沧江近南北向的构造带内,大桥及引道位于澜沧江两岸斜坡的中下部,斜坡海拔最高达4000米以上,桥面处海拔高度3000米。

根据桥区自然、地理环境,按照交通部的初步设计批复及专家审核意见,角笼坝大桥采用单跨、双塔,钢桁架加劲梁与钢筋混凝土桥面板的组合式悬索桥。大桥主跨345米,矢跨比1/10,设单向纵坡。桥梁净宽9米,总宽10.5米,钢桁架梁高3米(上、下弦杆中心高),其主梁制造长度6米,安装长度12米,吊重约210kN;主缆及吊索均采用镀锌高强钢丝、热铸锚具,主缆由37股索股成正六边形组成,每个索股有高强钢丝91丝;两岸索塔均采用箱形截面的内倾式钢筋混凝土梯形门架,芒康岸索塔高42.6米,盐井岸索塔高49.5米;两岸锚碇均采用隧道式预应力岩锚,预应力岩锚从锚塞尾部延伸到锚塞前端,以充分发挥岩石的抗拉作用。大桥自2003年8月开工建设,于2005年8月建成通车,现运营使用情况良好。大桥总体布置见图1:

2 技术标准和设计规范

2.1 技术标准

设计荷载:汽车—20级,挂车—100;

桥面宽度:净-9+2×0.5米(缘石);

设计风速:基本风压460Pa,颤振检验风速
[Ucr]=29.55米/秒;

地震裂度:7度;

引道等级:山岭重丘区三级,路基宽度
7.5米。

2.2 设计规范及参考手册

《公路工程技术标准》(JTJ01—97)

《公路路线设计规范》(JTJ011—94)

《公路桥涵设计通用规范》(JTJ021—89)

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTJ023—85)

《公路桥涵地基及基础设计规范》
(JTJ024—85)

《公路工程抗震设计规范》(JTJ004—89)

《大跨径悬索桥主缆索股技术条件》(征求意见稿)中华人民共和国交通部

《公路桥梁抗风设计指南》(人民交通出版社)

《钢结构工程技术手册》(华南理工大学出

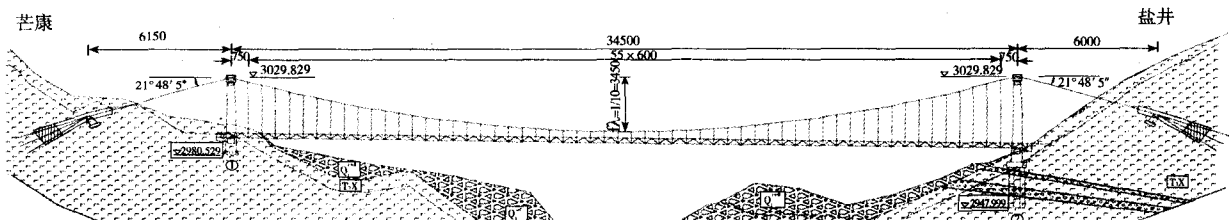


图1 角笼坝大桥布置图

出版社)

《涂装技术实用手册》(机械工业出版社)

《我国大跨径桥梁防护》(北京航空材料研究院)

3 自然条件

桥位所处澜沧江两岸山高、坡陡、谷深,第四系崩坡积层广布,为典型的高山峡谷地貌。气候随海拔的升高而变化显著,具有明显的青藏高原三江流域气候特征,温度随海拔的升高而降低。区内气候主要受由东向西的太平洋暖湿气流的影响,季节性降水明显,雨季主要集中于每年的6~9月,约占全年降水量的84%。芒康县气象局提供的资料显示,近二十年(1979年~1999年)来,最大年降水量约800毫米(1998年),年平均降水量为526毫米,最大日降水量55毫米。根据勘察期间实测,9月下旬室外最高温度达48℃,夜间只有3℃,10月下旬室外最高温度为23℃,最低-2℃,日照温差变化较大。

澜沧江河床狭窄,呈“V”型,河床纵坡较大,冲刷力强,两岸有零星Ⅲ级阶地出现。桥址区内出露的地层主要有第四系松散堆积层及三叠系小定西组玄武岩。区内地下水类型主要为第四系松散堆积层中的孔隙水和玄武岩基岩裂隙水,其补给、径流、排泄条件受岩性、地质构造及地形地貌的控制。桥址区内有两条冲沟,一是角笼坝沟,另一条是杂子拉沟。两条冲沟均较狭窄,沟宽3~8米,沟深30~70米,冲沟水的流量受大气降水控制,洪、枯季水位及流量变化大,具暴涨暴落特征。洪水期两沟常形成泥石流,冲刷力强。

桥址区位于澜沧江断裂带之东,处于主断裂与两条支断裂所切割的夹块上,距主断裂带约300~500米。因受其影响,区内断层及节理裂隙发育,岩体多被切割成碎块状~碎石状,其中在盐井岸有大小断层11条,这些断层均为压扭性逆断层,断层走向N50~80°E,倾向SE和走向N40~87°W,倾向NE及SW,断层倾角多在50~70°之间,层面上多见擦痕及磨擦镜面。据《中国地震烈度区划图》(1990年版),桥址区地震

基本烈度为Ⅶ度,由西藏自治区地震局地震工程研究所、中国地震局分析预报中心所作的《滇藏公路角笼坝大桥场地地震安全性评价》显示:桥区地震活动具有大约百年左右周期,具有明显的活跃—平静交替现象,近代地震活动水平比较低。桥址区内不良地质现象主要有:泥石流、崩塌岩堆、危岩危石等。正因为有不同程度的泥石流发生,尤以角笼坝沟最为严重,所以必须采用300米以上的大跨方案,才能完全避免角笼坝沟泥石流的危害。

4 设计方案

经过工可、初设及风洞模型试验后,角笼坝大桥采用单跨、双塔,钢桁架加劲梁与钢筋砼桥面板组合的悬索桥方案。主跨345米,矢跨比1/10,设单向2%纵坡,盐井岸较芒康岸高。

4.1 加劲梁及桥面系

加劲梁桁高3.0米(桁架上、下弦杆中心距),中心宽10.5米,上弦杆、下弦杆、竖杆均采用“H”型截面;横梁采用槽钢,腹杆、竖杆和风构采用角钢,主要受力构件材质采用Q345D。

考虑到角笼坝大桥运输状况,主桁分制造节段和安装节段。制造节段在工厂加工,制造节段桁片内所有构件均采用焊接,一个标准制造节段长6米,便于汽车运输。横梁桁片内所有构件也采用焊接,在工厂加工。制造节段运至工地现场后,采用高强螺栓连接,将两个制造节段的主桁桁片、横梁桁片组装成安装节段,一个标准安装节段长12米,吊重约210kN。安装节段采用吊装施工方法,各吊装单元间以高强螺栓连接。全桥共有55个标准制造节段,两个7.5米的端节端。主桁结构见图2。

主桁两端头分别设置拉压支座,侧面抗风支座,以抵抗正、负反力及平衡风荷载,两端各设SSFB400伸缩缝,为控制过大水平位移,在梁两端对称设置了4套阻尼器。

行车道板为C40的实心钢筋砼板,板长6米,中板宽1.74米,边板宽1.5米,横桥向由4个中板和2个边板组成。采用预制吊装,板与板横向之间采用铰接方式连接。为减少行车对主桁的冲击

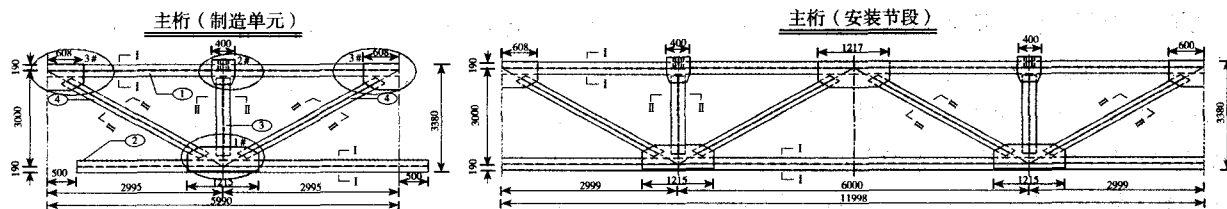


图2 主桁结构示意图

作用,行车道板下设置1.5厘米厚氯丁橡胶块,为防止安装阶段板的移位,在横梁上设置限位角钢挡块。桥面铺装采用C40钢纤维砼;为防止桥面开裂,每6米板在端头设宽2厘米深5毫米的锯缝,锯缝中灌以沥青。1.5%双向横坡由钢桁架形成。

4.2 主缆及吊索

主缆采用 $\phi^{\circ}5.1$ 镀锌高强钢丝平行索股(即PPWS),钢丝抗拉标准强度1670MPa。每根主缆由37股索股组成,每股索股由91丝 $\phi^{\circ}5.1$ 高强镀锌钢丝组成,其截面排列为正六边形,主缆直径在索夹外为 $\phi^{\circ}331$ 毫米,索夹处直径为 $\phi^{\circ}327$ 毫米。主缆矢跨比采用 $f/L=1/10$,两岸边跨主缆倾角均为 $21^{\circ}48'5''$ 。主缆锚具采用热铸锚,填充锌铜合金,主缆表面涂有9501B密封胶。

由于本桥较窄,为使锚塞布置不致相互重叠,且留有适当间距,主缆经主索鞍后,进行适当平弯,即主缆在平面形成 3° 外偏角。

吊索间距的选择是在考虑重力刚度的大小和桥面板的经济性后而确定为每隔6米设一对吊索,吊索设计中考虑了刚度的分配。吊索采用61 $\phi^{\circ}5.1$ 镀锌高强平行钢丝制作,钢丝抗拉标准强度1670MPa。吊索两端采用热铸锚具,灌注锌铜合金。吊索钢丝采用双层PE防护,即内层为黑色PE,外层为彩色PE,以增加美观性,吊索采用成品索,在工厂加工生产。

4.3 索塔

盐井岸索塔为斜度16.5:1的内倾式钢筋砼梯形门架,塔高54.5米,采用箱形截面,壁厚60厘米。由于断层破碎带的存在,盐井岸基础采用8根 $\phi^{\circ}220$ 厘米的群桩基础,以穿过不良地层,嵌入弱风化的玄武岩中。索塔底面尺寸为横桥向300厘米,纵桥向506厘米。盐井岸索塔的承台系梁为预应力混凝土结构,布设8束 $\phi^{\circ}15.2-7$ 钢绞

线,以抵抗倾斜的塔柱所产生的外推力,同时防止承台系梁开裂。

芒康岸索塔为斜度14:1的内倾式钢筋砼梯形门架,塔高47.6米,采用箱形截面,壁厚60厘米。基础因基岩出露良好而采用明挖扩大基础,基础嵌入基岩弱风化层的深度不小于3米。索塔底面尺寸为横桥向300厘米,纵桥向478厘米。

两岸塔身的塔柱由实心段和隔板分隔为多个箱室,塔柱上每隔5~6米高度,特别是每个箱室的底部,设置了一对直径12厘米的圆孔,以起到通风和排水的作用。

索塔设置两道预应力混凝土横梁,其截面均为薄壁箱形,上横梁位于塔顶端,主缆鞍座处,采用 3.00×2.50 米箱形断面,壁厚50厘米,布设10束 $\phi^{\circ}15.2-7$ 钢绞线。下横梁在主桁梁下,塔身实心段与空心段交界处,采用 3.00×4.00 米箱形断面,壁厚50厘米,布设14束 $\phi^{\circ}15.2-7$ 钢绞线。从方便施工和确保工程质量出发,在塔柱、上横梁、下横梁内均设置了由角钢组成的劲性骨架。

索塔顶端扩大形成主索鞍支承面,既美化了外观,又为主缆架设提供了施工平台。主索鞍外设置混凝土防护室。

4.4 锚碇

两岸锚碇均采用隧道式预应力岩锚,即隧道式锚碇和预应力岩锚相结合的组合结构,是山区建设悬索桥的一大特色,可以降低锚碇工程造价。以本桥为背景工程,建设方、设计方、施工方与西南交通大学联合进行了题为《隧道式预应力锚索复合锚碇作用机理及关键技术研究》。该锚碇及锚塞体段为变截面楔形棱体,前端宽8.0米,高8.0米,尾端宽12.0米,高12.0米。为了受力的合理,主缆由散索鞍处向下倾斜 6° 。整个锚碇锚固体系由锚塞、预应力钢绞线锚杆、锚塞预

应力索、调节拉杆、散索鞍基础组成。为了消除锚塞前端的应力集中现象,减少锚塞砧的开裂,对锚塞体施加了纵向预应力。预应力体系由37束OVM MD15-13锚塞预应力索及其配套锚具组成。锚塞体尾部设置预应力岩锚,以便将主缆拉力传入岩体,增加结构的安全度及防止锚塞砧的开裂,预应力岩锚长13米。锚碇系统设计见图3。

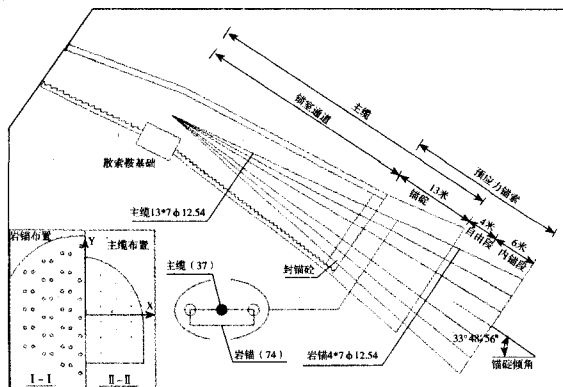


图3 锚碇系统设计

在设计中,每个锚塞设置74个岩锚,岩锚由 $\phi 130$ 毫米锚孔和 $\phi 15.2-4$ 预应力钢绞线构成,锚孔长13米。一根主缆丝股对应两根80毫米的调节拉杆,通过主缆锚具相互连接,两根调节拉杆又通过连接板(特制OVM MD15-13锚具)与锚塞预应力索相互连接,完成拉力的传递。为了保证施工时预应力钢绞线锚杆、锚塞预应力索及外套钢管能准确定位,锚塞内设置了由角钢组成的定位支架。为了防止锚洞开挖时,洞室局部垮塌的发生,全部锚室段、锚塞段均采用钢筋锚杆挂网喷浆支护体系。支护体系中,钢筋锚杆长4米,纵横间距2米布置一根。衬砌砧总厚度为50厘米,其中,第一层喷射砧支护层厚度为15厘米,第2层立模现浇层砧厚度为35厘米。在全部锚室段、锚塞段的顶面、侧面均设计有喷射砧支护层。

散索鞍基础为钢筋混凝土结构,长3.00米,宽2.20米,置于基岩弱风化层内。为了防止锚室内渗水,锚室壁均采用防渗砧浇筑,现浇接缝处均设置橡胶止水带,并对围岩缝隙作压浆处理。为了保持锚室内的干燥,每个锚室内均设置抽湿机一台。

5 主要计算

上部结构计算采用悬索桥专用程序SBCC、SBSNAP、桥梁博士及通用有限元程序“ALGOR”进行计算。计算工况选择恒载、活载、温度、风载、地震力及施工过程等组合工况。

经计算主要成果分析如下:

5.1 主缆

恒载作用下主缆的最大拉力为28044.38kN;

恒载+全桥满布活载的拉力: 33221.98kN;

恒载+全桥满布活载+温度降低 20°C :

33396.43kN;

根据上述结果,并考虑主缆在散索鞍的弯曲,安全系数 $K=3.04$ 。

5.2 加劲梁

在活载作用下,上弦杆最大压力为2056.6kN,相应杆端弯矩为17.8kN.m,上弦杆的最大拉力为576.2kN,相应杆端弯矩为3.8kN.m;下弦杆最大拉力为1984.9kN,相应杆端弯矩为3.4kN.m,下弦杆最大压力为575.3kN,相应杆端弯矩为2.3kN.m,斜腹杆最大轴力为560.3kN,相应杆端弯矩为2.3kN.m,经应力计算均满足要求。

5.3 索塔、横梁、吊索

索塔为小偏心受压构件,运营阶段塔顶最大纵向位移为3.1厘米。索塔上横梁、下横梁均为全预应力混凝土构件。芒康岸索塔扩大基础基底压应力组合I时为1.36MPa,附加组合时为1.69MPa;盐井岸索塔桩基最大单桩轴力组合I时为17107kN,附加组合时为19050kN,均满足规范要求。

锚碇主要成果为:锚碇整体抗抬升稳定安全系数为10.1;锚碇整体抗滑移稳定安全系数为3.37;锚碇整体嵌固安全系数为6.07;锚碇锚固组件最小安全系数为2.52;散索鞍基础基底压应力1.28MPa。

5.4 结构变形

在最不利荷载作用下,结构的竖向位移为0.7949m,梁端最大水平位移为0.1571m。

5.5 自振特性

表1 结构的前10阶振动频率和自振特性

编号	频率(HZ)	对应振型
1	0.1189	横向对称振型
2	0.1582	纵漂
3	0.2328	竖向反对称
4	0.2814	横向反对称为主与反对称扭转偶合
5	0.3242	竖向对称
6	0.4077	扭转反对称为主,与横向反对称偶合
7	0.4545	对称扭转为主与横向对称偶合
8	0.4680	横向反对称为主与反对称扭转偶合
9	0.5321	竖向反对称
10	0.6184	竖向对称

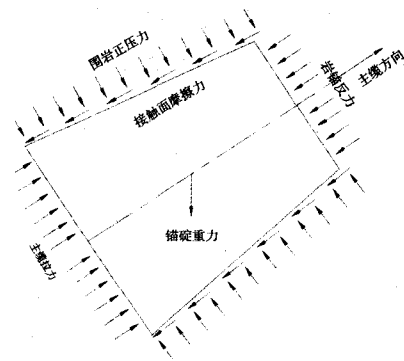


图4 隧道式预应力锚碇系统受力分析

5.6 预偏量 (从桥轴线上游往下看)

上游左塔: 0.1751m, 下游左塔: 0.2228m,
 上游右塔: 0.1714m, 下游右塔: 0.2178m。
 散索鞍处 $\Delta X=0.0263$ m

5.7 空缆线型

5.7.1 成桥状态

上游: 中跨跨中矢高34.5m; 下游: 中跨跨中矢高34.5m;

5.7.2 空缆状态

上游: 中跨跨中矢高32.3766m; 下游: 中跨跨中矢高32.1863m;

5.8 复合式锚碇的简化计算

复合式锚碇采用如下简化计算公式:

$$P_u K_1 = \xi_1 \xi_2 \sum \eta_i (\sigma_i \sin \alpha_i + \tau_i \cos \alpha_i) A_i + (1 - \xi_1) P_a + W_1 \sin \beta \quad (i=1 \sim 3)$$

其中, P_u 为主缆拉力的合力; P_a 为预应力锚索提供的反力;

K_1 为锚碇局部剪切破坏的安全系数, 一般取 1.5 ~ 2.5 主缆

η_i 为侧压力影响系数; σ_i, τ_i 为锚碇与围岩接触面上的法向应力和剪应力;

A_i 为锚碇拱部、底板和边墙面积; W_1 为锚碇自身重量;

α_i 为扩展角, 为拱部、底板和边墙侧表面与锚碇轴向夹角;

β 为锚碇轴向倾角;

ξ_1 为岩锚预应力影响系数; ξ_2 为泊松效应系数。

锚碇系统受力分析见图4。

6 主要试验项目

本桥为特大形桥梁, 为保证桥梁建设和运营的安全可靠, 进行了下列试验:

(1) 由于桥址区地质条件复杂, 故采用预应力岩锚, 为了进一步了解岩性抗拉特征及整体效应, 进行了岩锚抗拉试验, 以确定锚塞体及洞身长度。

(2) 为了保证大桥的建设顺利及工程质量的优良, 设计强调了施工的过程控制。及时的观测、分析计算, 对施工起到了很好的指导作用。

(3) 为了控制索夹夹紧力及主缆空隙率, 对索夹与主缆空隙率进行了实测及试验研究。

7 结束语

西藏角笼坝大桥是在西部山区成功建设的又一座具有自身特色、经济合理的悬索桥。我们通过多座相似悬索桥的设计, 认为: 采用钢桁架加劲梁和钢筋混凝土桥面板, 合理利用重力刚度, 配合地形、地质条件选择隧道式锚碇 (必要时加岩锚索组合) 的结构型式, 对于600米以下的悬索桥是经济合理的, 尤其适于在山区修建。具体在角笼坝大桥的设计上, 具有三个方面的特色:
 1. 主缆在散索鞍处下弯 6° , 在主索鞍后外倾 3° 。
 2. 预应力岩锚与隧道锚的组合锚碇。
 3. 主桁的制造节段和安装节段。角笼坝大桥的建成, 有力地保障了国防、促进了经济, 在桥梁建设中还涌现了全国典型人物陈刚毅。

参考文献

[1] 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院. 角笼坝大桥施工图. 2003.04.
 [2] 角笼坝大桥建设项目办等. 隧道式预应力锚索复合锚碇作用机理及关键技术研究. 2004.08.
 [3] 西南交通大学. 角笼坝大桥锚塞抗震计算分析研究报告. 2005.01.