

高海拔峡谷地带桥梁快速施工结构体系优化

张永水¹, 高昊¹, 刘文军², 黄永杰³, 连晓飞³

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 青海省公路管理局; 3. 中交基础设施养护集团有限公司)

摘要:以青海省大循高速公路卧龙沟4号桥为工程背景,结合高海拔峡谷地带跨越沟谷及该地区年施工期短的特点,从结构体系和构件组合两个层面阐述了该桥选择高墩T梁连续刚构的设计选型思路。通过对比研究发现:①采用先简支后连续(连续刚构)的结构形式,可以实现桥梁的快速施工,适应高海拔地区年施工期短的工程特点;②在构件层面选取“T梁+空心薄壁墩”的组合是比较合理的。

关键词:高海拔峡谷地带;快速施工;结构体系;构件优化

中国以青海省为代表的西北地区有其独特地域特征,该地区气候高寒、缺氧、多风,地形多山、地表高差大,桥隧占比较大。因此桥梁选型是一项涉及运营条件、施工方案、经济优化的综合性工作。

姚昌荣等从桥址处客观环境、结构受力特性以及美学角度综合论述了山区桥梁选型的原则,提出影响桥梁结构选型的因素主要有功能要求(安全适用、经济美观、养护方便等)以及约束条件(自然、经济、时间和技术);周剑萍通过T梁与小箱梁的结构对比、施工性能及使用性能对比,论述了T梁形式在山区桥梁中更具合理性;巩春领等针对大跨径刚构—连续组合桥梁的受力特点以及使用性能进行了探讨,发现刚构—连续组合结构在受力性能及使用性能上比连续梁桥更为优化;徐君兰、顾安邦等对连续刚构的主墩刚度合理性进行了探讨;周剑萍从施工经济性上对跨沟谷地区桥梁选型进行了对比,对不同地形采取的合理桥型进行了分析。

综上所述,以往的研究中针对西北高海拔地区的公路桥梁不同桥梁结构形式的受力性能、施工性能以及运营性能综合对比分析研究较少。而该地区自然环境主要有两个特点:①年施工期短,需要快速施工;②地形多山,地表高差大。

该文基于青海省大循高速公路卧龙沟4号桥,结合桥梁现场环境状况以及技术条件,针对高海拔峡谷地带高墩桥梁快速施工的特点进行桥梁体系及构件组合的优化选型。

1 工程背景

1.1 地形地貌

青海大循高速公路卧龙沟4号桥位区地貌单元属山麓斜坡堆积地貌,微地貌为山间凹地,现沟谷呈“U”字形。线路地面高程为2 965.56~3 079.65 m,地形起伏较大,主线跨越长度为560 m,地表最大高差达114.09 m。

1.2 气候

桥位区属高原大陆性气候,其特点是:气候温和、日照时间长、太阳辐射强、昼夜温差悬殊;区内地形复杂、高差大,气温随海拔升高而递减。境内最高气温为38.2℃,最低气温为-19.9℃,年平均气温8.7℃。昼夜温差大,县气象局统计年平均日温差为13.4℃,2012—2017年月平均气温变化趋势见图1。

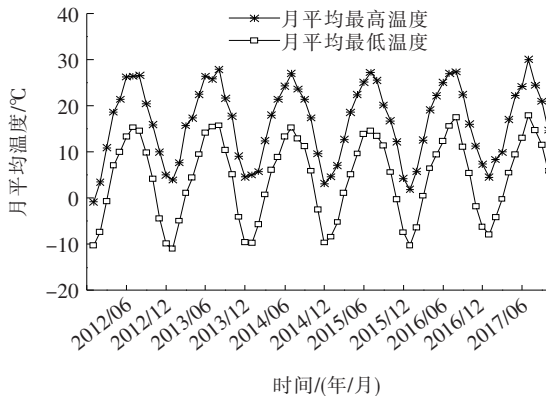


图1 循化县2012—2017年月平均气温变化趋势

收稿日期:2020-03-12

基金项目:青海省科学技术应用厅应用基础项目(编号:2016-ZJ-727)

作者简介:张永水,男,教授。E-mail:zhangyongshui@sina.com

由图 1 可见:当地月平均最低气温一年中有 6 个月处于 0℃ 以下,仅 4—9 月适宜进行施工,跨年施工时间间隔较长。因此对该桥而言,施工速度对项目的正常投入运营和施工质量的保证具有重要意义。

2 结构体系选型

文献[6,7]中总结论述了山区地带适用的各类桥型,该项目根据桥位纵断面及线位高度,提出几种备选桥型结构见图 2。桥梁结构体系选型一般采用“穷举法”,甄别各影响因素对桥梁体系选型的影响。

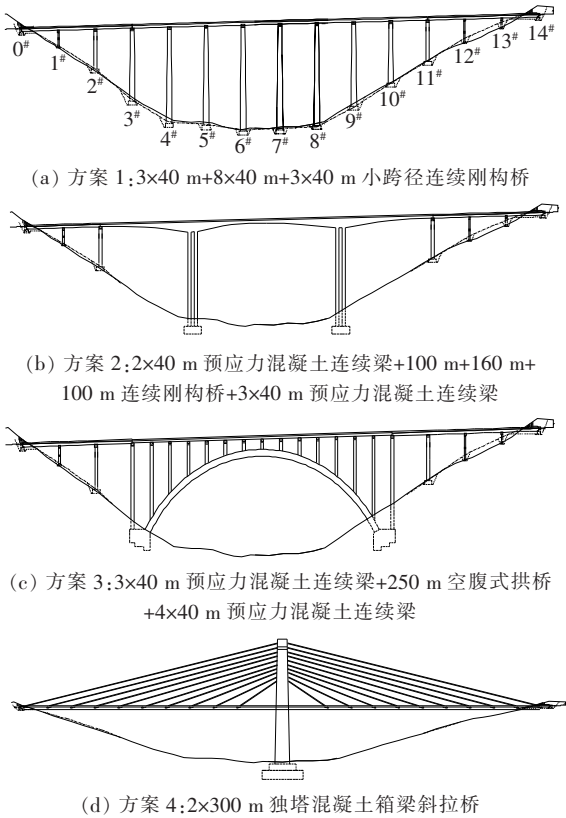


图 2 桥梁结构体系选型(桥型布置图)

该文从承载能力、桥梁造价、施工难度、施工工期以及后期养护几个方面对不同体系进行比较。拟选方案经济指标见表 1。

表 1 拟选方案经济指标

拟选 方案	承载 能力	桥梁造 价/万元	施工 难度	施工 工期/月	后期 养护
1	一般	2 673	一般	15	一般
2	一般	3 516	较大	15	较难
3	较大	4 153	较大	16	较难
4	较大	5 631	大	18	难

方案 1 采用小跨径预制装配式梁桥。桥墩布置较为密集,墩高高达 107 m,主梁采用预制装配式梁;方案 2 采用预应力刚构+装配式预应力箱梁,主桥桥墩可在山谷的两侧坡上设置,能够极大减少桥梁下部结构工程量,施工工法可采取挂篮悬臂浇筑法;方案 3 采用 3×40 m 预应力混凝土连续梁+250 m 空腹式拱桥+4×40 m 预应力混凝土连续梁,施工方法可采用缆索吊装法;方案 4 采用 2×300 m 独塔混凝土箱梁斜拉桥。

根据上述约束条件,施工工期是制约该桥的选型关键因素。装配式桥梁可以在工厂内生产预制构件,施工人员集中稳定,易于标准化施工、保证施工质量、提高生产速度,可以极大地缩短施工工期。而方案 2 尽管节省了大量下部结构工程量,但悬臂浇筑法体系普遍不能当年完成合龙,结构会因为混凝土龄期差异过大而产生次内力。方案 3 采用缆索吊装法施工,不仅施工工艺复杂,而且缆索吊装系统受峡谷地带多风气候的制约,施工安全风险较大。方案 4 造价较为高昂,且为柔性体系桥梁,同样受峡谷地带多风气候影响较大,因此方案 1 桥型显然更为合理。

连续梁桥与连续刚构桥的不同点为墩梁连接形式,连续刚构墩梁固结能够分担部分主梁弯矩,结构受力比连续梁桥更为优化,利用高墩的柔度来适应由预应力、温度变化、混凝土收缩徐变等效应产生的位移,并节省了大量支座、降低了养护维修难度。

该桥 0#~2# 与 12#~14# 墩墩身较低,刚度较大,不适宜采用墩梁固结形式。3#~11# 墩墩身较高,结构内力按照不同构件的刚度大小分配,即墩梁刚度比,结构刚度与构件的截面形式以及构件尺寸具有必然关联。

因此构件的截面形式选型问题是一个结构体系综合分析的问题,以达到结构受力最优的目的,将在下文详细论述。

3 高墩 T 梁刚构桥构件选型

桥梁构件选型问题实质上是桥梁构件之间刚度比对桥梁体系整体受力影响的问题,因此该文列举了几种常用的截面形式,不同截面形式的主梁与不同截面形式的墩身相互组合,即采用不同墩梁刚度比,综合分析其受力性能、施工性能以及经济性等,提出较为合理的墩梁刚度比以及构件选型。

3.1 桥墩刚度关系

对于连续刚构桥高墩选型主要考虑两个方面:分配主梁的弯矩以及承受施工过程中不平衡弯矩主要依赖于墩身抗弯刚度;适应上部结构温度变形、混凝土收缩徐变主要依赖墩身抗推刚度。文献[4]推导给出墩抗推刚度公式。以矩形墩为例,截面尺寸示意图见图3。

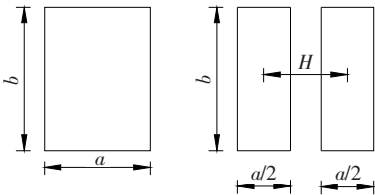


图3 截面尺寸示意图

单柱式墩的抗推刚度为:

$$K = \frac{3EI}{l^3} = \frac{Eba^3}{4l^3} \tag{1}$$

同等截面积下双柱式桥墩的抗弯刚度为:

$$G = E \times \left(\frac{ba^3}{48} + \frac{abH^2}{4} \right) \geq EI \tag{2}$$

抗推刚度为:

$$K = \frac{Eba^3}{16l^3} \tag{3}$$

式中: a 、 b 为墩柱顺桥向、横桥向宽度; E 为墩柱材料弹性模量; I 为墩柱抗弯惯性矩; l 为墩柱高度; H 为双肢墩中心间距。

可见,抗推刚度的大小与墩身截面惯性矩与墩高有关。对于单柱式墩,抗弯刚度与抗推刚度成正比关系。而双柱式墩的抗弯刚度提高,与墩间距 H 有关,抗推刚度仅为单柱式墩的1/4。该文选取几种墩身形式的刚度关系进行比较。桥墩刚度曲线图见图4。

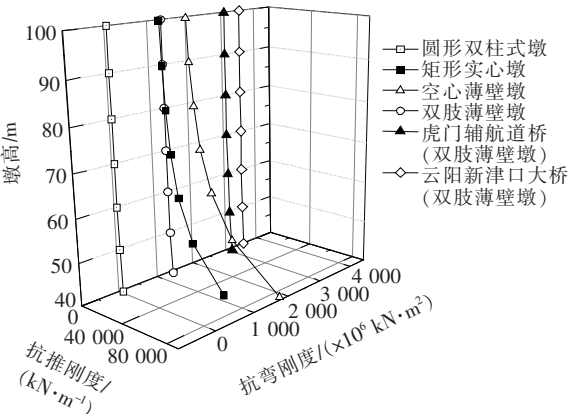


图4 桥墩刚度曲线图

由图4可知:随着墩高增大,墩身的抗推刚度迅速减小,40~70 m矩形实心墩、空心薄壁墩的抗推刚度

远大于双肢薄壁墩;墩身高度超过70 m时,几种墩型的抗推刚度迅速接近,墩身高度为100 m时,空心薄壁墩的抗推刚度仅为其他墩型的1~3倍。同等截面积下,空心薄壁墩能够保证较大的抗弯刚度。

对于高墩刚构体系桥梁,由于墩身本身高度较大、柔性较强,墩身截面选型对于其抗推刚度影响较小。因此,此时主导墩身结构选型的因素为其抗弯刚度以及施工性能等因素。

3.2 参数选取对比

结构选型选取40 m桥跨,单幅宽度12 m。T梁预制梁高2.5 m,中梁梁宽1.7 m,湿接缝宽度0.7 m;小箱梁预制梁高2.3 m,中梁顶板宽1.9 m,底板宽1.3 m,顶板厚0.3 m,底板及腹板厚0.25 m;整体式箱梁采用单箱双室结构,翼板宽度12 m,梁高2 m,顶板厚0.3 m,底板厚0.22 m,腹板宽0.5 m。

T梁横向布置图见图5,小箱梁横向布置图见图6,整体式箱梁见图7,截面特性对比见表2。

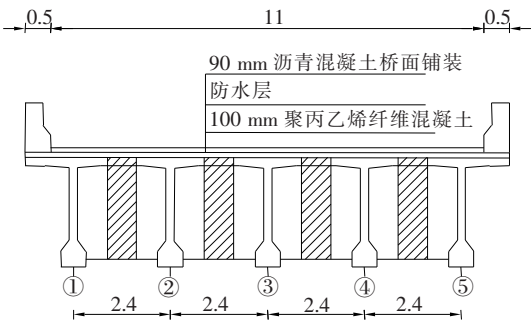


图5 T梁横向布置图(单位:m)

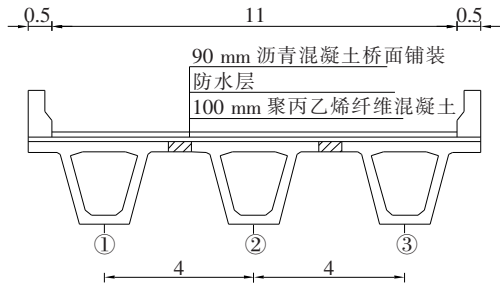


图6 小箱梁横向布置图(单位:m)

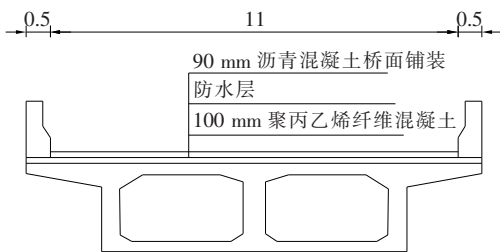


图7 整体式箱梁横向布置图(单位:m)

表 2 主梁截面特性对比

截面形式	单孔 数量/ 个	单梁 面积/ m ²	单梁竖向 抗弯惯性 矩/m ⁴	整孔惯 性矩/ m ⁴
T 梁(单片)	5	1.160	0.970	4.848
小箱梁(单片)	3	2.558	1.588	4.764
整体式箱梁	1	8.415	4.654	4.654

墩身的抗推刚度与其截面惯性矩和墩高有关,多跨一联时,墩梁的整体刚度计算较为复杂,以墩梁截面的抗弯刚度比值进行分析,简化表示墩梁刚度比的范围为:

$$\eta = \frac{EI_D}{EI_S} \tag{4}$$

式中: I_D 、 I_S 分别为墩柱、主梁抗弯惯性矩。

选取不同抗推刚度范围的 4 种墩身形式进行分析,墩身截面选型见图 8。

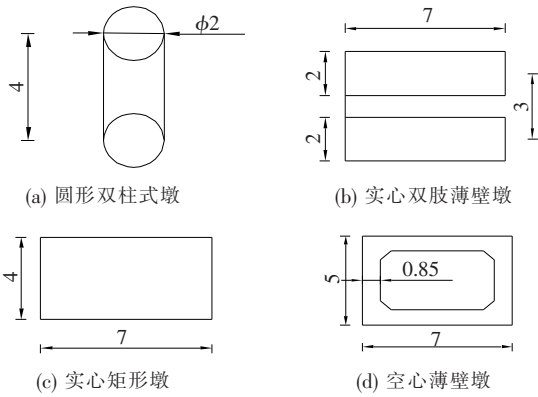


图 8 墩身截面形式(单位:m)

4 受力性能对比

如上所述,桥梁构件的刚度比不同影响荷载效应在结构中的内力分配。对于不同截面形式的混凝土构件,内力不能反映构件的应力状态。因此该文以应力作为结构优化的控制指标。

采用有限元分析软件 Midas/Civil 进行模型分析,分析结构为桥梁高墩部分,即 3[#]~10[#]墩下部结构及上部结构,3[#]、11[#]墩采用弹性连接模拟滑动支座、4[#]~10[#]墩采用刚性连接模拟墩梁固结。全桥采用杆系单元模拟桥梁受力状况,作如下假定:

- (1) 忽略滑动支座的摩阻力。
- (2) 按照平桥进行建模计算,不考虑桥面横坡的影响。

- (3) 采用墩底固结的假定,不考虑桩基础的影响。
 - (4) 主梁梁体视为弹性体计算其应力值。
- 根据历年来当地县气象局温度统计状况以及现场施工工期把控,结构体系整体升温为 23.2℃,整体降温为 30.9℃。考虑以下两个工况:
- 工况 1:结构自重+二期荷载+整体升温;
 - 工况 2:结构自重+二期荷载+整体降温。

该文选取结构应力最大部位进行比较,该桥边墩墩梁连接形式为滑动支座,主梁结构边跨与边墩内力最大,选取边梁最大正弯矩处拉应力、墩顶负弯矩处拉应力、边墩墩底最大压应力作为控制目标,在不同结构组合、不同工况下进行综合比较。

不同截面对结构应力影响见表 3。

由表 3 可知:

- (1) 各组合应力值对比中,在截面竖向惯性矩相近时,小箱梁由于自身构造原因,正弯矩应力值为 12.00~14.30 MPa,T 梁与整体式箱梁正弯矩应力值为 9~11 MPa,小箱梁应力普遍大于另外两种截面。
- (2) 所有组合墩梁刚度比为 0.31~17.07,两种工况下,随着墩梁刚度比的增大,T 梁和整体式箱梁的应力值随之减小;小箱梁应力值略有增大,变化不显著;从结构内力分配来分析,墩梁刚度比越大,对主梁的受力状态更为有利。
- (3) 截面组合相同,分析主梁正弯矩与支点处负弯矩应力变化量;组合 1~4 主梁应力跨中与支点处变化量分别为 0.12~0.86、1.96~3.48 MPa,组合 5~8 为 0.4~1.0、0.56~1.51 MPa,组合 9~12 为 0~0.75、0.5~2.71 MPa。工况 1 条件下,组合 1~4 应力变化量最小,工况 2 条件下,组合 5~8 应力变化量最小。可见墩梁刚度比对主梁跨中正弯矩应力影响不大,对负弯矩应力具有较明显的影响,且 T 梁与整体式箱梁主梁应力变化量与墩梁刚度比成正比。这表明刚度较大的墩在大温差变化下能够更多为主梁分担内力,使主梁应力减小。

(4) 分析墩身应力可以看出,墩身结构未出现拉应力,其应力大小直接与墩身截面特性相关,可以看出尽管双肢薄壁墩与矩形实心墩截面积较大,但矩形薄壁墩受力性能更为优越;且大温差变化下主墩应力变化量为 0.12~0.23 MPa,对墩身受力影响较小。

综上所述,考虑桥梁结构受力更为优化为前提,T 梁+矩形实心墩或空心薄壁墩,整体式箱梁+矩形实心墩或空心薄壁墩的应力值较小,墩梁刚度比较大的结构选型更为合理。

表 3 不同截面组合对结构应力的影响

组合	截面组合	墩梁刚度比 η	工况	主梁跨中应力/MPa	主梁支点处应力/MPa	墩底最大应力/MPa
1	T 梁+圆形双柱式墩	0.31	1	9.94	9.75	-5.19
			2	10.80	7.79	-5.31
2	T 梁+矩形实心墩	7.25	1	9.60	10.10	-3.36
			2	9.79	6.93	-3.56
3	T 梁+双肢薄壁墩	14.06	1	9.23	9.66	-3.26
			2	9.63	8.20	-3.46
4	T 梁+矩形薄壁墩	16.38	1	9.51	10.20	-2.97
			2	9.63	6.72	-3.14
5	小箱梁+圆形双柱式墩	0.31	1	12.00	8.82	-5.26
			2	13.00	7.31	-5.38
6	小箱梁+矩形实心墩	7.38	1	13.40	10.20	-3.41
			2	13.90	9.48	-3.64
7	小箱梁+双肢薄壁墩	14.30	1	13.30	10.30	-2.12
			2	14.30	8.94	-2.03
8	小箱梁+矩形薄壁墩	16.67	1	13.50	10.10	-3.03
			2	13.90	9.54	-3.23
9	整体式箱梁+圆形双柱式墩	0.32	1	10.20	8.78	-5.44
			2	10.20	8.28	-5.57
10	整体式箱梁+矩形实心墩	7.56	1	9.82	8.68	-3.42
			2	9.17	6.19	-3.63
11	整体式箱梁+双肢薄壁墩	14.64	1	9.68	8.23	-3.31
			2	9.66	7.32	-3.53
12	整体式箱梁+矩形薄壁墩	17.07	1	9.87	8.77	-3.04
			2	9.12	6.06	-3.22

5 施工经济性比较

高原峡谷地带地势险要、地表落差大,运输条件差,大型起重设备不易入场作业,如采用不合理的施工方法,势必提高建设成本,因此施工经济性是制约该桥的一项重要因素。桥梁单孔施工特性以及经济性比较见表 4。

从施工技术条件以及峡谷地带类似项目经验来看,

表 4 截面特性对比

截面形式	单孔数量/个	梁高/m	单片梁吊装重量/t	预制混凝土/m ³	横桥向湿接缝数量/处	隔板数量/个	每孔支座数量/个	每孔施工成本/元	养护加固难度
T 梁	5	2.5	108.57	40.72	4	5	5	2 654 623	简单
小箱梁	3	2.3	242.24	82.16	2	3	6	2 463 518	一般
整体式箱梁	1	2.0	875.16	269.28	0	1	4	3 227 822	一般

由表 4 可知:小箱梁单孔施工成本略低于 T 梁,建筑高度较低,单孔梁片数量较少,横桥向湿接缝数量也相应减少;每片梁下设置 2 个支座,施工稳定性较好。

整体式箱梁具有良好的整体性,其结构刚度较大,但同时其自重较大,在高原峡谷地带运输起重条件较差的地带应用较为困难。

T 梁吊装重量较轻,无需大型起重设备,更为适用于山区地带桥梁。其缺点是每孔梁片数量较多,现场横向湿接缝工作量较大,施工稳定性低于另外两种截面形式。

从养护难易程度分析,小箱梁与整体式箱梁内部箱室完全封闭,难以进行病害检查以及加固。文献[5]指出这种封闭式箱梁内模拆除相对困难,容易对箱梁顶底板结构造成损伤;T 梁结构完全暴露在外,方便对结构进行检查及加固,其运营经济性优于其他两种截面形式。

文献[3,9]针对 T 梁与小箱梁的构造以及施工性能等方面进行了对比,认为小箱梁适用于城市桥梁,T 梁在山区桥梁更为适用。

对于墩身构件截面选型,墩身截面的不同,相应的工程量以及施工方法也不同,文献[10]从价值评估的角度分析,得出 20~40 m 墩高采用双柱墩,40~70 m 采用单柱实心墩或单柱空心墩,70 m 以上采用单柱空心墩的截面形式造价最为经济。

文献[11]以后湾特大桥为例,针对 V 形沟谷地区地势险要、施工便道不便展开的施工条件,桥墩采用了柱式墩与空心薄壁墩的截面形式。采用滑模工法施工空心薄壁墩能够适应施工工作面限制的技术条件。

6 结 论

基于青海省海东市大循高速公路项目,针对高海拔峡谷地带的特殊环境要求与技术条件限制,约束因素主要有两点:① 年施工期短,需要快速施工,所以采用了先简支后结构连续刚构,而未采用大跨;② 受地形影响采用了高墩。

在选型因素制约下,选用了小跨径连续刚构结构形式。由于连续刚构,墩梁刚度不同,其受力特点也不同,存在墩梁构件选型问题。从不同截面组合的受力性能、施工性能、经济性角度综合比较了各种选型的优缺点,得出以下结论:

(1) 不同桥墩抗推刚度随着墩高的增加而迅速接近,墩高 40~70 m 时,双肢薄壁墩具有更加优越的刚度性能;墩高超过 100 m 时,不同墩型的抗推刚度接近,空心薄壁墩受力性能与施工性能更佳。

(2) 通过分析计算结果,墩梁刚度比较大的构件选型,墩身对主梁分配弯矩更为优化,主梁应力值更小,因此对于高墩连续刚构桥建议采用墩梁刚度比较大的构件选型。

(3) T 梁自重小,易于进行吊装施工,施工成本较为适中,截面形式易于养护加固。空心薄壁墩采用爬模或翻模施工,减少现场模板支护,能够极大地提高施工速度。

最终确定该地区的桥梁建设采用 T 梁+矩形薄壁墩的小跨径连续刚构形式。

参考文献:

- [1] 姚昌荣,李亚东,梁东,等.山区大跨度桥梁结构选型[J].桥梁建设,2012(6).
- [2] 王雪姣.桥梁概念设计研究[D].西南交通大学硕士学位论文,2010.
- [3] 周剑萍.小箱梁与 T 形梁综合比选分析[J].公路,2013(9).
- [4] 巩春领,肖汝诚.大跨径刚构—连续组合梁桥整体受力分析与探讨[J].结构工程师,2004(5).
- [5] 徐君兰,顾安邦.连续刚构桥主墩刚度合理性的探讨[J].公路交通科技,2005(2).
- [6] 周剑萍.高原山区高速公路跨越沟谷地形时的桥型比选[J].公路,2013(5).
- [7] 黎立新,何智勇.高速公路山区桥梁选型及安全风险评估[J].公路,2011(7).
- [8] 张伟.高海拔峡谷地带高墩桥梁选型研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2017.
- [9] 闫海青.山区桥梁建设及上部比选论述[J].华东公路,2014(1).
- [10] 林建川,冀涛,李元珍.空心薄壁墩滑模施工安全管理技术[J].公路,2013(9).
- [11] 罗晓瑜,陈艾荣,吴怀义,等.山区高墩 T 梁桥桥墩价值工程研究[J].中国公路学报,2013(5).
- [12] 翟晓亮,陈定市.中小跨径桥梁结构形式优选[J].中外公路,2018(3).
- [13] 周小年.墩身结构对高墩大跨桥梁施工稳定性影响研究[J].中外公路,2018(4).
- [14] 程建新,余周,霍凯荣.高墩大跨度刚构桥上部结构施工关键技术应用[J].中外公路,2017(4).
- [15] 张虎,赵建祥,李玲玉.山区刚构桥超高墩位移敏感性与稳定性分析[J].中外公路,2016(4).