

文章编号:1673-2049(2013)03-0107-05

## 山区公路曲线拱桥合理悬臂长度计算

段翔<sup>1</sup>, 韩蕊<sup>2</sup>, 王斌华<sup>2</sup>, 吕彭民<sup>2</sup>

(1. 云南交通咨询有限公司, 云南 昆明 650031; 2. 长安大学 道路施工技术与  
装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了研究山区公路曲线拱桥设计方法,以跨径120 m、桥面平曲线半径400 m、拱肋轮廓曲线半径900 m的曲线拱桥为研究对象,根据桥面各种受力工况及桥梁本身的受力情况,通过整桥有限元模型分析,研究拱脚、1/4拱肋和拱顶处扭剪应力与桥面悬臂长度的变化关系,从而获得合理的桥面悬臂长度;同时通过对其他跨径进行有限元分析计算,得到不同跨径、不同平曲线半径桥面合理的悬臂长度,并给出了不同跨径、不同平曲线半径下桥面悬臂长度的计算公式。提出的设计方法可为曲线拱桥的设计提供参考。

**关键词:**曲线拱桥;悬臂长度;平曲线;拱肋;有限元分析;山区公路

中图分类号:U448.22

文献标志码:A

## Calculation of Rational Cantilever Length on Mountain Highway Curve Arch Bridge

DUAN Xiang<sup>1</sup>, HAN Rui<sup>2</sup>, WANG Bin-hua<sup>2</sup>, LU Peng-min<sup>2</sup>

(1. Yunnan Traffic Consulting Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to analyze the design methods of mountain highway curve arch bridge, a curve arch bridge was studied, in which the span diameter was 120 m, the curve radius of the deck outline was 400 m, and the outline curve radius of the arch rib was 900 m. By the analysis of finite element model for the whole bridge, the relations between the torsional shear stress and the bridge cantilever length, at the arch foot, 1/4 arch rib and vault, were studied and the rational deck cantilever length was obtained. Through finite element analysis of other curve arch bridges with different spans, the optimum values of the deck cantilever with different spans, different horizontal curve radius decks were obtained, and the calculation formulae of the deck cantilever length were given. The design method proposed in the paper can provide reference for curve arch bridge design.

**Key words:** curve arch bridge; cantilever length; horizontal curve; arch rib; finite element analysis; mountain highway

## 0 引言

在桥梁系列中,拱桥是建筑历史最悠久的一种

桥型,它具有跨越能力大、承载能力高、可因地施材、造价经济、养护维修费用少、造型美观等特有的技术优势,从而具有较强的竞争力,且长盛不衰。随着技

收稿日期:2013-07-10

基金项目:云南省交通厅重点科研项目(2010525)

作者简介:段翔(1964-),男,云南大理人,高级工程师,E-mail:448999164@qq.com。

术的发展,拱桥在跨径、结构形式上都取得了显著的成绩<sup>[1-3]</sup>。人们在大跨径拱桥的设计、施工安装和试验分析等方面进行了一系列研究<sup>[4-10]</sup>,但迄今为止各国对曲线拱桥的理论计算研究成果较少,影响了曲线拱桥的实际应用。

中国西南山区公路由于受地形地貌的影响,有些地方更适合修建曲线拱桥。为了研究大跨径曲线拱桥的设计方法,本文中笔者以跨径 120 m、桥面平曲线半径 400 m、拱肋轮廓曲线半径 900 m 的曲线拱桥为研究对象,以桥面悬臂长度为控制变量(悬臂长度变化范围为 2.2~4.0 m,步长变化 0.2 m),采用汽车荷载为公路-II 级,计算不同桥面悬臂长度下拱脚、1/4 拱肋以及拱顶处的扭剪应力。对于合理拱肋截面的选择,拱脚与 1/4 拱肋的扭剪应力理论上应该相等,从而确定出合理的悬臂长度。并通过有限元计算和数据拟合,得到不同跨径、不同平曲线半径下桥面悬臂长度的计算公式,为曲线拱桥的设计提供参考。

1 120 m 桥跨有限元计算与分析

1.1 桥型几何参数的确定

参考拱桥设计规范并结合中国西南山区的实际情况可知,山区公路曲线拱桥一般为双向 2 车道,选取的设计平曲线计算模型如图 1,2 所示,桥面宽度为 12 m,拱肋为变截面形式,同时为了受力合理和施工方便,确定拱肋中心线沿水平方向为直线。根据受力情况,确定拱肋轮廓线半径  $R_2=900$  m,拱顶宽度为 8 m,最大悬臂长度  $a\leq 4$  m。

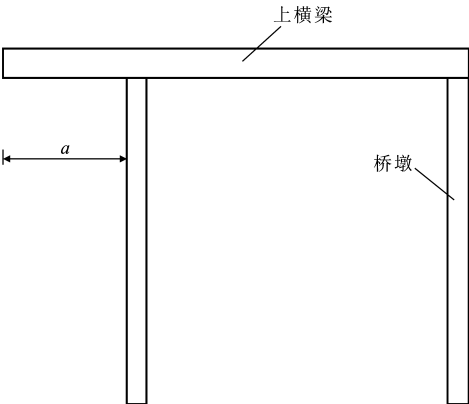


图 1 桥墩示意  
Fig. 1 Schematic of Bridge Pier

1.2 桥梁截面尺寸

选择拱肋截面形式为单箱三室结构,拱顶和拱脚截面尺寸如图 3 所示,拱肋为钢管桁架、钢管内灌 C50 混凝土、外包 C50 混凝土形式,拱肋高 4 m,拱

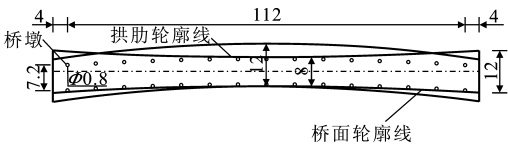


图 2 桥面几何尺寸(单位:m)  
Fig. 2 Geometric Dimensions of Deck (Unit:m)

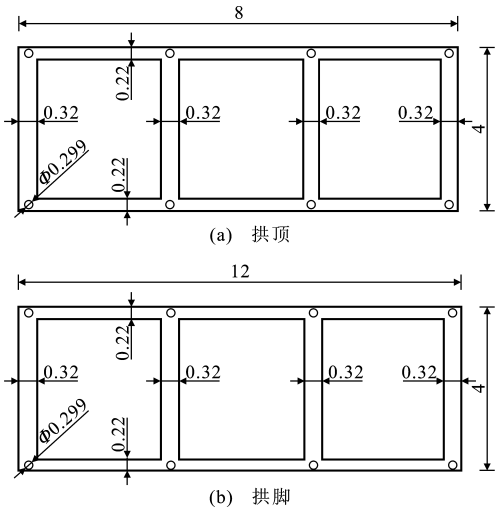


图 3 拱顶和拱脚截面尺寸(单位:m)

Fig. 3 Section Sizes of Vault and Arch Foot (Unit:m)

脚宽 12 m,拱顶宽 8 m,拱肋矢跨比 1/5,拱轴系数  $m=1.33$ 。腹孔立柱为  $\Phi 0.8$  的圆形截面柱,设计时可根据实际情况确定截面形状和尺寸。盖梁截面尺寸为 80 cm×100 cm。

1.3 全桥有限元模型的建立

计算中使用的材料特性见表 1。

表 1 材料特性

Tab. 1 Material Characteristics

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	结构部分
钢	206	0.3	7 850	钢管拱肋
C50 混凝土	25	0.2	2 550	拱肋、桥面及墩柱

在有限元模型中,使用了三维梁单元 Beam4 对拱桥的拱肋、墩柱、桥面系进行了模拟。建立模型时对拱肋施加全约束,对桥面施加  $y$  方向移动自由度。在桥面与桥墩上的横梁之间设置了耦合边界,并在耦合边界上施加  $x,y,z$  方向的移动自由度,以模拟桥面的真实情况。全桥有限元模型见图 4。

1.4 荷载的确定

主要考虑自重和汽车荷载对拱肋的影响。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004),汽车荷载采用公路-II 级。该规范中汽车荷载由车道荷载和车辆荷载组成,车道荷载由均布荷载  $q_k$  和集中

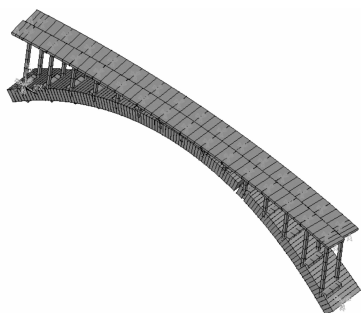


图 4 全桥有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Whole Bridge

荷载  $P_k$  组成。桥梁结构的整体计算采用车道荷载;桥梁结构的局部加载、涵洞、桥台和挡土墙压力等的计算采用车辆荷载。车辆荷载与车道荷载的作用不得叠加。因此,本文中的荷载采用车道荷载,车道荷载的计算示意如图 5 所示,其中,  $q_k = 7.875 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $P_k = 156 \text{ kN}$ 。车道荷载的均布荷载标准值应满布于使结构产生最不利效应的同号影响线上;集中荷载标准值只作用于相应影响线中一个最大影响线峰值处。

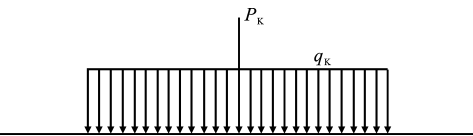


图 5 车道荷载计算示意

Fig. 5 Schematic of Calculation of Lane Load

加载方式分为 2 车道同时加载和内、外车道分别加载。

1.5 计算控制参数的选取

当桥面以及拱肋的几何尺寸确定后,最关键的就是确定桥面拱肋的布置位置,见图 6。

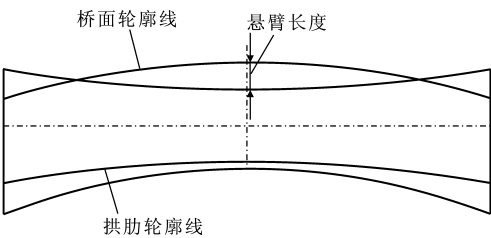


图 6 全桥俯视图

Fig. 6 Overview of Whole Bridge

当悬臂长度不同时,桥面荷载通过桥墩柱传递给拱肋的扭矩是不同的,因此就需要确定合适的悬臂长度,使得拱肋上的扭矩分布合理,充分发挥其抗扭能力。因此以悬臂长度为控制参数,建立不同悬臂长度下的各种全桥模型,计算出各种桥型下的拱肋扭矩,进而得出拱肋的扭剪应力、轴向应力,并依

据拱肋截面的抗扭刚度及抗弯刚度找出合理的悬臂位置。

经初步计算,桥面悬臂长度应小于等于 4 m,考虑到拱顶及拱脚处的桥墩都应该满足此要求,由此确定出桥面布置位置分别为拱顶桥墩处桥面悬臂长度 4 m 和拱脚桥墩处桥面悬臂长度 4 m 这 2 种桥面布置方式。

通过分析确定拱顶桥墩处的桥面悬臂长度变化范围为 2.2~4.0 m,即计算控制参数的变化范围为 2.2~4.0 m。

1.6 模型计算结果分析

1.6.1 拱肋不利工况的确定

对于拱肋的弯矩,以悬臂长度为 2.8 m 的工况为例,建立有限元模型计算不同影响线、不同车道加载方式下拱肋的弯矩,结果如图 7 所示。由图 7 可知,各工况下拱肋弯矩差异较小,究其原因 是车辆荷载相对拱桥自重很小,因此加载方式的变化对拱肋的弯矩影响较小,为计算方便,计算拱肋弯矩时可选择双车道 1/4 拱肋影响线为计算工况。

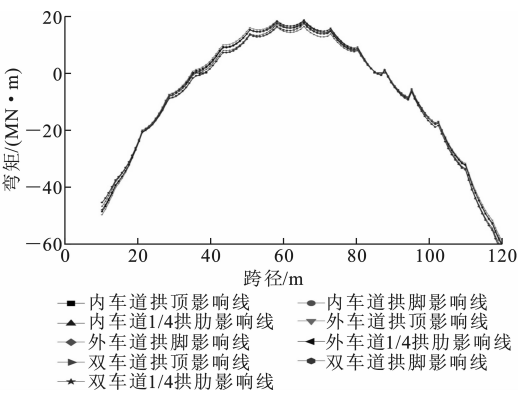


图 7 不同影响线、不同加载方式下拱肋的弯矩

Fig. 7 Bending Moments of Arch Rib Under Different Influencing Lines and Different Loading Modes

对于拱肋的扭矩,同样以悬臂长度为 2.8 m 的工况为例,建立有限元模型,计算不同影响线、不同车道加载方式下拱肋的扭矩,结果如图 8 所示。由图 8 可知,不同影响线、不同加载方式下,拱脚、1/4 拱肋以及拱顶出现最大扭矩的工况依次为内车道拱顶影响线和外车道 1/4 拱肋影响线。因此其余悬臂位置的计算,就可以选取以上 2 种工况为计算控制工况。

1.6.2 截面扭矩的变化规律

根据上述工况分别计算出悬臂长度由 2.2 m 变化到 4.0 m(步长为 0.2 m)时的所有拱肋扭矩和弯矩。通过计算分析发现,悬臂长度的调整对拱肋

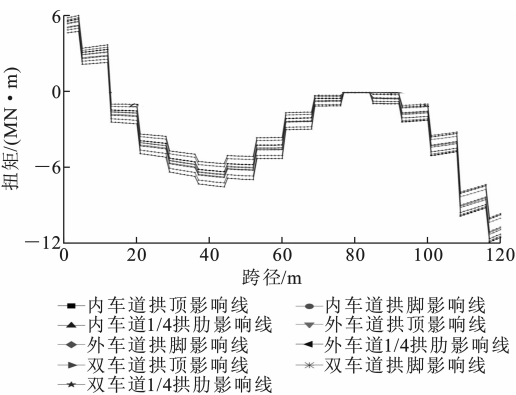


图 8 不同影响线、不同加载方式下拱肋的扭矩

Fig. 8 Torques of Arch Rib Under Different Influencing Lines and Different Loading Modes

的弯矩影响不大,而扭矩则变化较大。对拱脚、1/4 拱肋以及拱顶扭矩进行分析,得到拱肋的拱脚、1/4 拱肋以及拱顶处扭矩与悬臂长度的关系曲线,如图 9 所示。

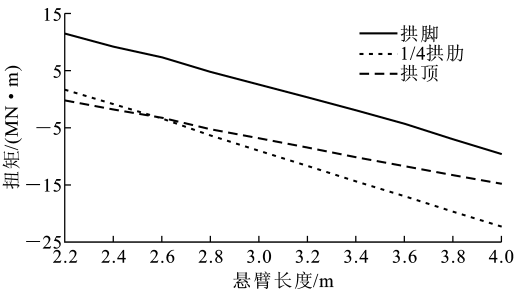


图 9 拱肋的拱脚、1/4 拱肋和拱顶处扭矩与悬臂长度之间的关系

Fig. 9 Relations of Cantilever Length with Torques at Arch Foot of Arch Rib, 1/4 Arch Rib and Vault

1.6.3 合理悬臂长度计算

拱肋为单箱三室薄壁箱形截面,扭矩  $M$  产生的剪应力  $\tau$  的计算公式为

$$\tau = \frac{M}{2A\delta} \tag{1}$$

式中: $A$  为箱梁薄壁中线所围面积; $\delta$  为箱梁壁厚。

计算可得拱脚处箱梁薄壁中线所围面积为  $4\,918\text{ m}^2$ ,1/4 拱肋处箱梁薄壁中线所围面积为  $4.258\text{ m}^2$ ,拱顶处箱梁薄壁中线所围面积为  $4.038\text{ m}^2$ ,取  $\delta=0.22\text{ m}$ 。

采用五点法对拱脚、1/4 拱肋以及拱顶扭剪应力进行分析,得到拱肋的拱脚、1/4 拱肋和拱顶处扭剪应力与桥面悬臂长度的关系曲线,见图 10。

对于合理拱肋截面选择,拱脚与 1/4 拱肋的扭剪应力理论上应该相等,这样可以充分发挥拱脚以及 1/4 拱肋处的抗扭能力。因此,得出合理悬臂长

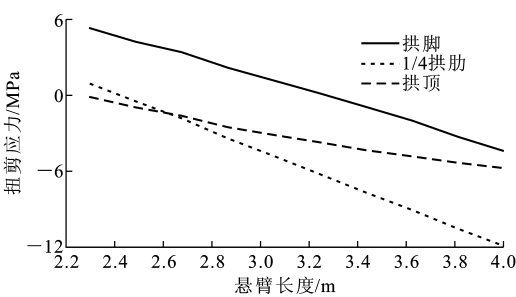


图 10 拱肋的拱脚、1/4 拱肋和拱顶处扭剪应力与悬臂长度之间的关系

Fig. 10 Relations of Cantilever Length with Torsional Shear Stresses at Arch Foot of Arch Rib, 1/4 Arch Rib and Vault

度的计算公式为

$$|y_1| = |y_2| \tag{2}$$

式中: $y_1$  为拱脚扭剪应力; $y_2$  为 1/4 拱肋扭剪应力。

根据方程组

$$\begin{cases} y_1 = -5\,370\,083.278x + 17\,244\,960.02 \\ y_2 = -7\,161\,836.025x + 16\,713\,992.59 \end{cases}$$

可求解得出  $x=2.710\text{ m}$ 。因此,可以认为该桥面的合理悬臂长度应为  $2.710\text{ m}$ 。

2 不同跨径、不同平曲线半径下桥面悬臂长度计算

根据上述计算方法可计算不同跨径、不同平曲线半径下桥面合理悬臂长度。使用 ANSYS 的 APDL 语言建立不同跨径、不同桥面平曲线半径的有限元模型,计算拱肋扭矩采用汽车荷载公路-II 级。拟合桥面轮廓线的半径与合理悬臂长度之间的关系,如图 11 所示。

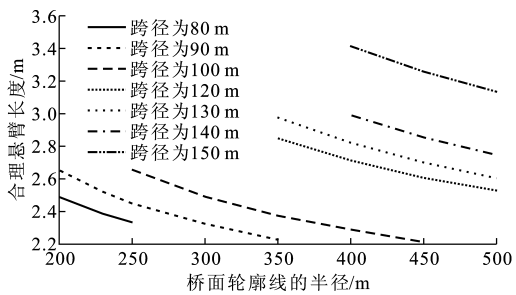


图 11 桥面轮廓线的半径与合理悬臂长度之间的关系

Fig. 11 Relations of Radius of Bridge Deck Profile and Rational Cantilever Length

根据桥面轮廓线的半径与桥面合理悬臂长度的关系曲线,可得出  $80\sim150\text{ m}$  各跨径的合理悬臂长度的计算公式分别为:

跨径  $80\text{ m}$  时

$$a=10^{-5}R^2-0.009R+3.817 \quad 200\leq R\leq 250$$

跨径 90 m 时

$$a=10^{-5}R^2-0.008R+3.945 \quad 200\leq R\leq 350$$

跨径 100 m 时

$$a=6\times 10^{-6}R^2-0.006R+3.881$$
$$250\leq R\leq 450$$

跨径 120 m 时

$$a=5\times 10^{-6}R^2-0.006R+4.534$$
$$350\leq R\leq 500$$

跨径 130 m 时

$$a=5.8\times 10^{-6}R^2-0.00741R+4.8575$$
$$350\leq R\leq 500$$

跨径 140 m 时

$$a=6\times 10^{-6}R^2-0.00784R+5.165$$
$$400\leq R\leq 500$$

跨径 150 m 时

$$a=6.4\times 10^{-6}R^2-0.0085R+5.813$$
$$400\leq R\leq 500$$

式中: $R$  为桥面轮廓线的半径。

由计算结果可知,桥面合理悬臂长度随着桥面轮廓线半径的增大而减小,但两者之间并不是线性关系,而是二次函数关系。利用此计算公式求得的桥面悬臂长度可以充分发挥曲线拱桥的抗扭能力,使其受力更加合理,安全可靠。

### 3 结 语

(1)根据山区公路结构特点和曲线拱桥的受力特点,提出了变截面单箱三室拱肋结构,且在水平面内桥面为曲线而拱肋为直线的结构形式,这样不仅满足实际工程需要,而且改善了拱肋的受力状况;同时变截面不仅受力合理,而且结构美观。

(2)通过对典型跨径 120 m 的计算和分析,提出了曲线拱桥结构分析计算方法。

(3)根据典型跨径 120 m 的分析方法,对跨径 80~150 m 曲线拱桥进行有限元计算分析,得到在不同曲线半径下的合理悬臂长度计算公式,为今后的桥梁设计提供了理论依据。

#### 参考文献:

#### References:

[ 1 ] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,1985.  
YAO Ling-sen. Bridge Engineering[M]. Beijing: China Communications Press,1985.

[ 2 ] 范剑锋. 大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装过程的仿真计算分析[D]. 武汉:武汉理工大学,2002.

FAN Jian-feng. Analysis of Simulation Calculation on the Rib-hoisting Process of Long-span CFST Arch Bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2002.

[ 3 ] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥施工问题研究[J]. 桥梁建设,2002(3):55-59.  
CHEN Bao-chun. Study on Construction of Concrete-filled Steel Tube Arch Bridge[J]. Bridge Construction,2002(3):55-59.

[ 4 ] 乔玉英. 定长扣索法在大跨径钢管混凝土拱桥拱肋安装中的应用[D]. 重庆:重庆交通学院,2003.  
QIAO Yu-ying. The Application of Limit Length of Cable Method in Long-span Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge's Rib Assembling[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2003.

[ 5 ] 李晓辉,陈宝春. 大跨径拱桥的发展[J]. 世界桥梁,2007(1):9-12.  
LI Xiao-hui, CHEN Bao-chun. Development of Long Span Arch Bridges[J]. World Bridges,2007(1):9-12.

[ 6 ] 陈宝春,孙潮. 石潭溪大桥施工受力分析[J]. 中国公路学报,1998,11(4):51-57.  
CHEN Bao-chun, SUN Chao. Mechanic Analysis of the Construction Phase of Shitanxi Bridge[J]. China Journal of Highway and Transport,1998,11(4):51-57.

[ 7 ] 陈江华,钟善桐. 钢管混凝土拱桥受力分析及截面优化设计[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1995,28(5):60-78.  
CHEN Jiang-hua, ZHONG Shan-tong. Behavior Analysis and Section Optimation of Concrete Filled Steel Tubular Arch Bridge[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture,1995,28(5):60-78.

[ 8 ] 杨梦纯,林雄,王天亮. 广州丫髻沙大桥主拱钢管拱安装施工设计[J]. 桥梁建设,1999(2):49-51.  
YANG Meng-chun, LIN Xiong, WANG Tian-liang. Construction Design of the Erection of the Main Steel-tube Arch of Guangzhou Yajisha Bridge[J]. Bridge Construction,1999(2):49-51.

[ 9 ] ARZOUMANIDIS S G, BIENIEK M P. Finite Element Analysis of Suspension Bridges[J]. Computers and Structures,1985,21(6):1237-1253.

[10] ZHANG Z, NIAO X, NIE D, et al. Construction Techniques of the Arch Ring of Panzhihua Baishagou Bridge[C]//LOURENCO P B, OLIVELRA D B, PORTELA A. Proceedings of the Fifth International Conference on Arch Bridge. Madeira: LDA Publishers,2007:783-790.