

# 大跨混凝土梁式桥合理化构造研究

陈凯<sup>1</sup>, 王晓宁<sup>2</sup>, 许波<sup>2</sup>, 丁少凌<sup>2</sup>

(1.中国港湾工程有限责任公司, 北京市 100027; 2.中交第二公路勘察设计院有限公司)

**摘要:**采用多变量解析法研究大跨混凝土梁式桥构造,通过梁高、腹板厚、底板厚三变量试算,推荐合理化的构造尺寸,并结合依托工程采用软件验证。研究成果除满足规范要求外,还兼顾结构长期变形、腹板开裂、底板防崩的影响,大幅提高了结构的承载能力及结构耐久性。该研究思路清晰、原理简单,可有效避免半经验、半理论设计方法带来的风险,具有较强的推广价值。

**关键词:**大跨混凝土梁式桥; 合理化构造; 多变量解析法; 零弯矩或恒载反弯矩

大跨度混凝土梁式桥因其造价低廉、施工方便、工艺成熟、耐久性好、具有较好的景观效果,被广泛应用于公路和市政大跨度桥梁。但是,部分该类型桥梁在施工和运营过程中常会出现一些问题,诸如底板崩裂、腹板开裂、荷载长期作用下的中跨下挠等情况,反映了该类桥型在设计、施工方面确实存在缺陷。

众多文献对桥梁下挠现象进行了机理分析,认为其主要的影响因素为:①成桥弯矩不合理导致长期徐变下挠;②腹板开裂降低了梁体刚度,陷入开裂→下挠→再开裂的恶性循环;③预应力长期损失、混凝土计算参数与理论存在偏差。一般来说,前两个因素是导致桥梁长期下挠的主要原因,但也具备从设计上改进的条件。对于连续梁体系,如按照零弯矩或恒载反弯矩理论控制成桥主梁弯矩,理论上中跨的徐变位移为零或者向上。对于连续刚构体系,弯矩徐变同连续梁;轴力徐变与收缩效应相同,中跨会产生向下的位移。成桥阶段按照零弯矩或恒载反弯矩理论控制时,可改善跨中下挠现象,同时因正压应力的增加,腹板主拉应力减小,腹板开裂的风险也相应降低。连续刚构桥宜将成桥状态双薄壁墩墩顶轴力差控制在10%以内,降低因墩身双肢徐变效应差导致的中跨下挠。

底板崩裂问题,已有文献对此阐述较为客观、全面,该文不再赘述。但需要说明的是,合龙束效应由一次、二次组合而成,短束的二次效应明显比长束小,故设计时需尽可能降低合龙束用量以降低底板崩裂的风险。另外,合适的边中跨比,也是结构受力是否合理的关键。据统计,合适的边中跨比为0.52~0.6。边中跨

比较大时,有利于控制中跨下挠,但需搭设一定长度的支架浇筑边跨现浇段,施工成本较大。另一方面,当边中跨比较小时可能会出现过渡墩支座脱空、主墩双肢反力差较大等问题,在设计时需特别考虑。

针对上述问题,该文依托一大跨混凝土梁式桥,采用多变量解析方法,通过梁高、腹板厚、底板厚三变量试算,推荐合理化的构造尺寸,以避免或减少上述问题的发生,并结合依托工程采用软件验证。

## 1 工程背景

忙海河大桥主桥是永德(链子桥)至耿马(勐简)高速公路SJ1标段的控制性工程,该桥采用(65+120+65)m预应力混凝土连续刚构,桥宽2×12.75m,为双向四车道高速公路桥梁,设计车速80km/h,荷载标准为公路—I级。地震动峰值加速度为0.2g,抗震设防烈度为8度。下部结构主墩墩身采用双肢等截面矩形实体薄壁墩,肢间净距为4.8m,单肢截面尺寸为7m×2.2m,墩高分别为100和71m;过渡墩墩身采用等截面矩形空心墩,截面尺寸为6.5m×3.5m,壁厚为0.5m;桥墩采用桩基础。其总体布置图如图1所示。

## 2 基于多变量解析法的合理化构造设计

### 2.1 多变量解析法及基本假定

大跨混凝土梁式桥通常采用半经验、半理论的方

法来确定设计参数,带有一定的偶然性,可能造成材料用量明显偏离合理值的现象。以往研究主要集中在梁高及抛物线指数两个方面,未结合腹板、底板厚度的影响,因而分析结论仍然有较大的偶然性。对于梁高、底板厚度的抛物线指数取值,工程设计者倾向于取 2.0,这可降低底板崩裂的风险。

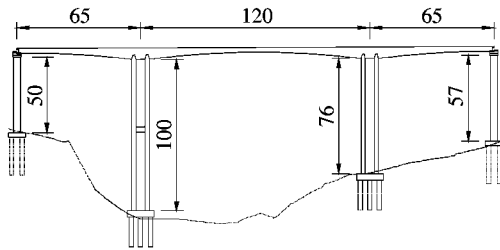


图1 忙海河大桥总体布置图(单位:m)

该文研究采用解析法,求解大跨混凝土梁式桥内力并进行组合,通过梁高、腹板厚、底板厚三变量试算,得出主梁尺寸范围,以材料用量作为主要评判标准,推荐合理化的构造尺寸,并结合依托工程采用软件验证。解析法基于以下假定:采用三跨连续梁进行结构解析,对于连续刚构按照双肢位置截取对应的截面尺寸;梁高、底板厚度、一期恒载重量按照 2 次抛物线变化,顶板尺寸、底宽、跨中底板厚度根据工程经验取值,跨中腹板厚度不小于 0.45 m,如图 2 所示。边跨及 1/2 中跨主梁的截面刚度沿跨径方向以 3 次抛物线变化(拟合结果);中跨合龙束一次弯矩在布置范围内按 2 次抛物线变化,如图 3 所示。主梁成桥弯矩控制在二期恒载弯矩反向值 0~25% 之间,主墩双肢轴力根据需要采用边跨配重或中跨顶推方式调整。

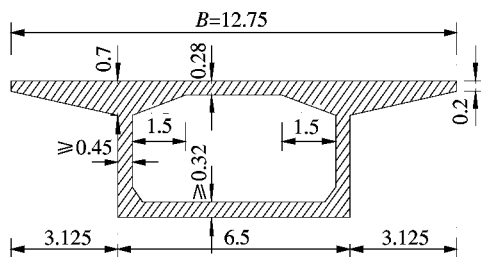


图2 箱梁横断面图(单位:m)

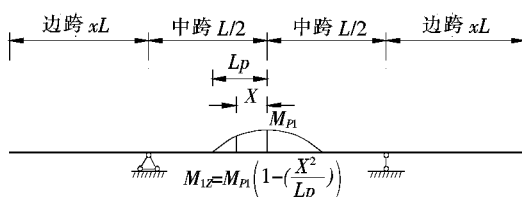


图3 中跨底板合龙束一次弯矩图示

## 2.2 各工况下任意截面内力分析

根据基本假定,可解析求出各工况下任意截面的内力值,限于篇幅,仅列出部分弯矩解析公式:

根部截面一期作用恒载下弯矩值:

$$M_{dl1-g} = -\frac{(q_1 + 5q_0)}{48}l^2 \quad (1)$$

中跨跨中钢束总弯矩值:

$$M_{gs-z} = (1 - \eta_{gs2})M_{p1} \quad (2)$$

中跨跨中汽车荷载弯矩值:

$$M_{mv-z-\max} = (\alpha\eta_2 + 0.125)q_{mv}l^2 + (0.5\alpha\eta_{1-2}(\epsilon=0) + 0.25)F_{mv}l\eta_{1-2}$$

$$\eta_2 = \frac{\alpha \int_0^1 \frac{t^2}{1 + (k-1)t^3} dt - \alpha \int_0^1 \frac{1}{1 + (k-1)t^3} dt}{2 \int_0^{2\alpha} \frac{t^2}{1 + \frac{(k-1)t^3}{8\alpha^3}} dt + 8\alpha^2 \int_0^1 \frac{1}{1 + (k-1)t^3} dt}$$

$$\eta_{gs2} = \frac{4\alpha^2 \int_0^{2l_p/l} \frac{[1 - (\frac{l}{2l_p}t)^2]}{1 + (k-1)t^3} dt}{\int_0^{2\alpha} \frac{t^2}{1 + \frac{(k-1)t^3}{8\alpha^3}} dt + 4\alpha^2 \int_0^1 \frac{1}{1 + (k-1)t^3} dt}$$

式中: $q_0$ 、 $q_1$ 为跨中、根部一期恒载集度; $q_{mv}$ 、 $F_{mv}$ 为考虑了车道折减系数、冲击系数后的均布力及集中力; $k$ 为根部与跨中抗弯惯性矩比值; $\alpha$ 为边中跨跨径比值, $l$ 为中跨跨径; $M_{p1}$ 为合龙束一次弯矩。

## 2.3 跨中截面尺寸拟定

以梁高及腹板厚度为变量,试算满足规范要求的变量范围,验算位置为跨中、距跨中 9 m 处,如图 4 所示。经分析可知:梁高上限受上缘抗裂要求控制;梁高下限受跨中上缘压应力控制;腹板厚度受跨中 9 m 处抗剪截面要求控制。上缘拉应力、下缘压应力、腹板厚度分别按规范的要求控制,得出中跨跨径 120 m 刚构最小梁高 2.1 m,最大梁高 5.4 m,在此范围内,尽量降低梁高,并控制底板合龙束的用量以降低崩裂风险,确定跨中梁高为 3.1 m,如图 5 所示。对于依托工程,跨中腹板的最小厚度受竖向预应力钢筋安装尺寸控制,取 0.45 m;跨中底板最小厚度受跨中合龙束安装尺寸控制,取 0.45 m。

根据以上原则,得出桥宽为 12.75 m 时中跨跨径 80~200 m 的跨中最大梁高、最小梁高和推荐梁高如图 6 所示。

## 2.4 根部截面尺寸拟定

跨中截面确定后,根部截面变量为梁高、底板厚、

腹板厚。根据工程经验并适当延伸变量搜索范围,梁高为计算跨径的  $1/16 \sim 1/20$ 、底板厚为梁高的  $1/8 \sim 1/14$ 、腹板按  $0.6 \sim 0.9$  m 及  $0.75 \sim 0.9$  m 两种情况考虑,以混凝土用量为主要控制指标,计算结果如图 7 所示(图中  $G$  为一期恒载中墩顶反力,对应结构混凝土用量)。

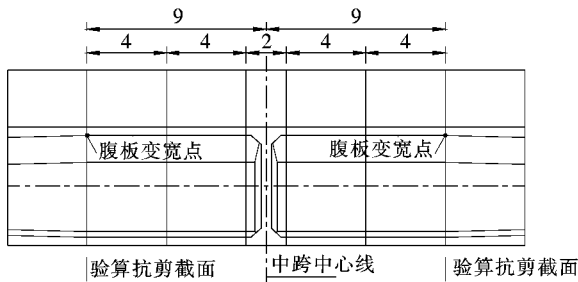


图 4 中跨跨中抗剪截面验算位置(单位:m)

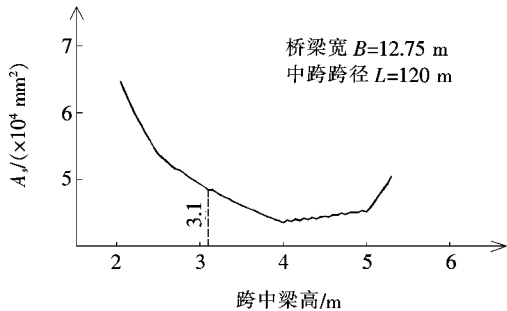


图 5 中跨底板合龙束用量

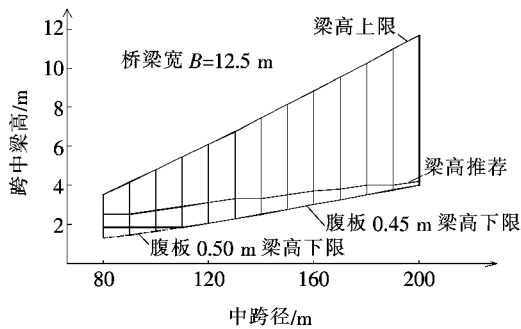


图 6 中跨 80~200 m 跨中梁高范围

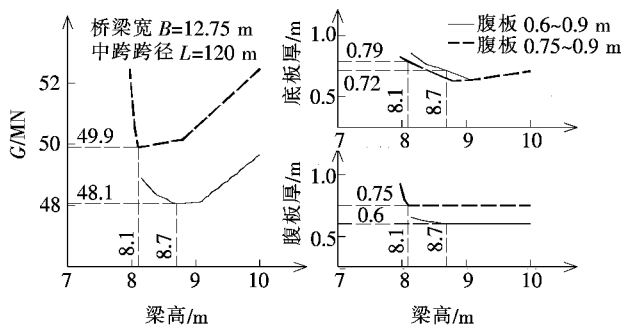


图 7 根部截面与混凝土方量关系图

由图 7 可以看出:当腹板搜索范围为  $0.6 \sim 0.9$  m, 连续梁最优根部梁高为 8.7 m、底板厚 0.72 m、腹板厚 0.6 m;当腹板搜索范围为  $0.75 \sim 0.9$  m, 连续梁最优根部梁高为 8.1 m、底板厚 0.79 m、腹板厚 0.75 m;两种情况下的最优解主梁混凝土用量差值为 3.7%。

为增加斜腹板抗裂储备,设计时取腹板厚 0.75 m 对应尺寸,在双薄壁外边缘处截取后,依托工程采用根部截面尺寸为:梁高 7.6 m,腹板厚 0.75 m,底板厚 0.75 m。

## 2.5 腹板厚度沿跨径布置

腹板厚度沿跨径布置需要满足抗剪截面、抗剪承载能力、斜截面抗裂要求。根据解析结果,腹板厚度受抗剪截面控制,根据剪力组合值计算腹板的厚度并绘制厚度曲线。设计时为便于施工,常采用双节段过渡腹板厚度,依托工程采用的腹板厚度与解析曲线对比如图 8 所示。

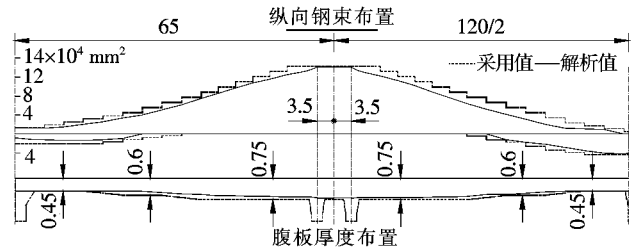


图 8 纵向钢束及腹板厚度解析值与设计值对比图(单位:钢筋用量: $\text{mm}^2$ ,结构尺寸:m)

## 2.6 纵向钢束估算

纵向钢束的布置需要使主梁满足承载能力极限要求(抗弯承载能力及受压区高度)、正常使用极限状态要求(正截面及斜截面抗裂、正截面压应力)、成桥弯矩分布状态(改善跨中下挠情况)等。根据解析工况按规范可计算出任意截面的上、下缘钢束用量,依托工程采用的纵向钢束布置与解析曲线对比见图 8。

相对于之前的配束方式,该桥的配束增加了悬浇节段的钢束量,减少了合龙束用量。悬浇钢束的增加通过增加腹板钢束规格实现,这样可避免因增加悬浇束而增加断面尺寸,同时也有利于限制腹板斜裂缝的发生。悬浇束的增加可能导致短悬臂状态底板下缘拉应力过大,在验算时并未出现此问题,其原因在于该设计方法同时增加了梁高,截面的抗弯刚度增加。

## 2.7 材料指标

根据上述构造和配束,依托工程平均每平方桥梁混凝土用量为  $1.14 \text{ m}^3$ ,混凝土钢束平均用量为  $52.5 \text{ kg/m}^3$ 。与之前设计较为合理的桥梁(均为中跨 120

m,边跨 65 m 连续刚构)进行对比(表 1),依托工程桥梁材料指标基本相当,其中混凝土指标略有降低(依托项目的梁高略有增加,但底板厚度有所降低),钢束指标略有增加(采用反向恒载弯矩理论设计),但明显提高了主梁的承载能力、降低了跨中长期下挠、腹板开裂等风险。

表 1 同类型桥梁设计指标比较

桥梁名称	桥宽/ m	混凝土指标/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ )	钢束指标/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )
德胜村大桥	12.50	1.17	51.2
盘龙河 3 号大桥	12.00	1.16	50.9
忙海河大桥	12.75	1.14	52.5

表 3 程序计算结果解析法控制指标对比表

对比项目	正截面抗 裂/MPa	腹板主拉 应力/MPa	最大压应 力/MPa	10 年累计 位移/mm	双肢最大 反力差/%
程序计算值	-0.3	0.98	15.30	16.5	9.8
解析法控制值	0.0	控制腹板尺寸	15.75	控制为向上	根据经验控制 $\leq 10$

注:应力为拉正压负,位移向上为正,向下为负。

由表 3 可知:使用阶段正截面抗裂最小压应力为 0.3 MPa;不考虑竖向预应力的情况下腹板主拉应力为 0.98 MPa(1/4 中跨位置);标准值组合下的最大压应力为 15.3 MPa;10 年徐变完成后,中跨跨中徐变总位移为 10.2 mm(向上为正,下同)、收缩总位移为-8.0 mm,累计总位移 16.5 mm。成桥阶段主梁弯矩为恒载反向值,主墩墩顶双肢轴力差为 6.5%、9.8%。

计算结果表明:按照该文方法控制的箱梁构造尺寸和钢束配置满足规范的各项要求,且具有较高的安全储备,证明了该文提出方法的合理性。

3 结论

(1) 采用多参数解析方法确定大跨混凝土梁式桥的结构尺寸、预估纵向钢束用量是可行的。该方法可避免半经验、半理论设计方法导致的材料用量超标或设计经验不足导致的结构安全风险,有较强的推广价值。

(2) 大跨混凝土梁式桥跨中梁高主要受上缘压应力控制,腹板厚度受抗剪截面(距跨中 9 m 处)控制,在满足要求的梁高范围内,合适的底板合龙束用量对应的最小梁高即为合理梁高。根部截面尺寸主要受抗弯受压区高度、上缘压应力控制,不同的梁高需要匹配合适的底板、腹板厚度,使得混凝土用量最小的尺寸最

2.8 程序验证

采用 Midas 软件建立依托工程的总体计算模型。在不考虑普通钢筋的情况下,主梁抗弯承载能力有较大的安全储备,见表 2。

表 2 主要截面承载能力验算

位置	$\gamma M_u /$ (MN · m)	$M_n /$ (MN · m)	安全系数
根部	-795.6	-1 148.4	1.44
1/4 中跨	-194.8	-405.5	2.08
1/2 中跨	141.4	158.7	1.12

程序计算结果与解析法控制指标对比见表 3。

为合理。

(3) 在以往的设计中,常出现合龙束偏多的现象,这也是导致底板崩裂的主要原因。采用该文的研究方法合理控制合龙束用量,降低底板崩裂风险。

(4) 大跨混凝土梁式桥设计除满足现行规范要求外,建议考虑成桥状态的结构受力形态,以控制中跨下挠及腹板的开裂,如采用零弯矩或反向恒载弯矩理论控制主梁成桥弯矩、控制双薄壁墩成桥阶段轴力差等措施。采用该文方法进行设计时,主梁材料指标与之前设计较为合理的桥梁基本相当,但结构安全可控且明显提高了主梁的承载能力、降低了跨中长期下挠、腹板开裂等风险。

参考文献:

[1] 彭元诚,汪金育,廖朝华,等.山区大跨度连续刚构桥[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.  
[2] 马振栋,刘安双.控制大跨连续刚构桥梁过度下挠的技术措施[J].桥梁建设,2015(2).  
[3] 陈双全.恒载零弯矩理论在克服梁桥梁体开裂下挠中的应用[J].公路,2013(1).  
[4] 潘瑾,汪兰.大跨径连续梁桥长期下挠产生机理及影响因素分析[J].工程建设与设计,2018(3).  
[5] 冯鹏程,吴游宇,杨耀铨,等.连续刚构桥底板崩裂事故的评析[J].世界桥梁,2006(1).

# 多片拱肋系杆拱桥荷载横向分布系数算法探究

王金龙

(山东高速科技发展集团有限公司, 山东 济南 250002)

**摘要:**系杆拱桥吊杆横梁弹性支撑在系梁和吊杆连接节点上,是桥梁中直接承受荷载和传力的重要构件。该文采用杠杆法、弹性支撑连续梁法、空间有限元程序算法。分析了3片拱肋系杆拱桥荷载横向分布系数的计算方法,通过对比得出了三者的差异,指出了设计时应予以重视之处。

**关键词:**系杆拱桥;荷载横向分布计算;杠杆法;弹性支撑连续梁法;空间有限元程序算法

下承式系杆拱桥是一种无推力的拱式组合体系桥,为外部静定结构,兼有拱和梁二者的优点,目前在中国桥下净空受限的平原地区或地基不良等地区得到了越来越广泛的应用。

无论是两片或多片系杆拱桥,都是空间结构,采用空间模型计算较为准确,但是建立空间模型较为繁琐,活载需要用影响面来布载,而且还要处理好桥面板与横梁的连接模拟,这样计算工作量将大大提高。为了简化计算,设计上经常用平面结构来等效处理,活载在各片拱中的分配用横向分布系数来反映,这样既可以大大减少计算工作量,又可满足工程精度的要求。

两片拱肋系杆拱桥在工程上常用杠杆法进行荷载横向分布系数计算,此法对于两片拱肋的情况较为适用。但为了适应现代交通对宽桥面的要求,特别在市政道路上,经常需要建3片或4片拱肋即多片拱肋的系杆拱桥。针对多片拱肋系杆拱桥空间结构平面化处理的关键在于活载横向分布系数的确定,其计算方法的选用极为重要,选择不当可能会对结果造成较大的误差。目前桥梁界普遍按照弹性支撑连续梁的形式进行横向分布计算,文献[1]对等跨等刚度弹性支撑连续梁的各种情况作了阐述,并制定了不同的表格供运用;

文献[2]针对横向不等跨及横梁刚度沿长度变化的情况,运用杆系有限元的基本原理,借助弹簧刚度矩阵,提出了荷载横向分布按弹性支承连续梁的精确解法,并用实桥试验结果进行了验证。但对于多片拱肋系杆拱桥荷载横向分布计算的其他方法研究较少。

该文针对工程实例分别采用杠杆法、弹性支撑连续梁法及空间有限元程序算法进行多片拱肋系杆拱桥荷载横向分布系数计算,并对3种方法的结果进行对比分析,以明确其优劣。

## 1 杠杆法

杠杆法是将横梁在各片系梁处断开,简支在系梁上,然后根据各支撑点处反力影响线求出各片拱肋的活载横向分布系数。此法对于两片拱肋的下承式系杆拱桥较为适用,但对于多片拱肋情况是否适用也是该文研究的重点。

该文以某下承式钢筋混凝土系杆拱桥为例,桥梁计算跨径60 m,桥面布置为:1.2 m(边拱)+0.25 m(防撞栏杆)+11.25 m(行车道)+0.25 m(防撞栏杆)+1.5 m(中拱)+0.25 m(防撞栏杆)+11.25 m(行车

- \*\*\*\*\*
- [6] 彭元诚.连续刚构箱梁底板崩裂原因分析与对策[J].桥梁建设,2008(3).
- [7] 吴俊斌,刘汉锡,王惠队,等.连续刚构桥主梁参数优化方法研究[J].铁道科学与工程学报,2017(7).
- [8] 李明燕,方志.预应力混凝土连续刚构桥的参数优化[J].

- 公路工程,2008(1).
- [9] JTGD62-2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [10] 交通部公路科学研究院.高墩大跨径弯桥的设计与施工技术[R],2007.

收稿日期:2018-06-10

作者简介:王金龙,男,工程师,E-mail:976615594@qq.com