

# 混凝土箱梁桥剪应力偏载系数简化计算方法

苏红军

(中交第三公路工程局,北京市 100102)

**摘要:**针对当前简化计算方法在预测箱梁桥剪应力偏载系数时存在的不足以及数值方法计算过程复杂不利于推广使用的问题,该文基于箱梁桥弯曲剪应力计算的一般方法以及薄壁杆件扭转和畸变的基本理论,通过适当的简化和等效处理,提出了适用于箱梁桥截面形式、能手算完成的剪应力偏载系数简化算法。为验证该文方法的合理性及有效性,以3座已建预应力混凝土连续箱梁桥的数值模拟结果为基准,对比了该文方法、有限元法、修正偏压法以及经验系数的适用性。研究表明:①该文简化方法计算结果与数值模拟结果较为一致,且计算过程简单,非常适合在桥梁设计过程中对剪应力偏载系数进行快速计算;②经验系数法和修正偏压法并不适用于剪应力偏载系数的取值计算,两种方法对于剪应力偏载系数的计算结果严重偏低,且难以考虑不同截面的差异性,在设计阶段留下了腹板主拉应力超限甚至开裂的隐患。

**关键词:**桥梁工程;剪应力偏载系数;简化计算方法;预应力混凝土箱梁桥;薄壁杆件扭转

## 1 引言

预应力混凝土箱梁桥,以其良好的抗弯、抗扭性能,优越的技术经济指标,在桥梁工程中得到广泛应用。这类桥梁,在偏心活载作用下,会出现加载侧实际正应力和剪应力大于对称加载时弯曲正应力和剪应力的现象。这种现象通常被称为偏载增大效应,相应的应力增大系数被称为偏载系数。

JTG D62—2012《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》明确规定:作用(或荷载)效应的内力计算应计入多车道设计汽车荷载引起的偏载增大效应,作用效应的横向偏载增大效应可采用精细化有限元模型计算。基于以上要求,文献[5—7]给出了考虑扭转和畸变效应的杆单元数值计算方法;文献[8]、[9]基于有限元实体单元对箱梁桥的偏载效应进行了分析。数值方法计算精度较高,但这种方法只能对设计好的桥梁进行验证计算,且建模过程复杂,要综合考虑弯曲、约束扭转及畸变效应的影响,一般设计人员很难掌握,不利于在桥梁设计过程中推广使用。目前,工程师普遍采用的偏载系数取值方法是:经验系数法和修

正偏压法。经验系数法较为笼统,且不考虑荷载偏心距和截面尺寸的影响,认为偏心活载引起的约束扭转和畸变正应力约为相应弯曲正应力的15%,引起的剪应力(包括自有扭转剪应力、约束扭转引起的二次剪应力以及畸变剪应力)约为相应弯曲剪应力的5%。修正偏压法则综合考虑了荷载偏心距、截面尺寸对偏载系数的影响,能够对箱梁桥偏载系数做出更为客观的评价,其具体计算过程在多个文献中均有介绍。文献[5]、[6]、[12]分别以解析解和数值解为基准对比了经验系数法和修正偏压法的适用性,发现经验系数法和修正偏压法对大部分桥梁正应力偏载系数均可给出安全的结果,但两种方法对于剪应力偏载增大系数的估计严重不足,且直接对跨中截面进行计算。近些年来,变截面预应力混凝土箱梁桥腹板斜裂缝普遍存在的事实也在一定程度上反映出箱梁桥剪应力偏载系数取值偏低的问题。

针对当前简化计算方法在预测箱梁桥剪应力偏载系数时存在的不足以及数值方法计算过程复杂设计人员难以掌握的问题,该文基于箱梁桥弯曲剪应力计算的一般方法及薄壁杆件扭转和畸变的基本理论,通过适当的简化和等效处理,提出了适用于箱梁桥截面形

式、能手算完成的剪应力偏载系数简化计算方法。与试验、数值模拟和其他简化计算方法的对比结果表明:经验系数法和修正偏压法对于剪应力偏载系数的计算结果严重偏低,在设计阶段留下了腹板主拉应力超限甚至开裂的隐患;该文方法的计算结果与数值模拟基本一致,与试验结果相比具有一定的安全系数,且计算过程简单,适合在设计过程中对剪应力偏载系数进行快速计算。

## 2 常用的偏载系数简化计算方法

目前较为常用的剪应力偏载系数主要为经验系数法和修正偏压法。

### 2.1 经验系数法

经验系数法较为笼统,且不考虑荷载偏心距和截面尺寸的影响,认为偏心活载引起的约束扭转和畸变正应力约为相应弯曲正应力的 15%,引起的剪应力(包括自有扭转剪应力、约束扭转引起的二次剪应力以及畸变剪应力)约为相应弯曲剪应力的 5%。

$$\xi_s = 1.15 \quad (1)$$

$$\xi_r = 1.05 \quad (2)$$

### 2.2 修正偏压法

修正偏压法将箱梁腹板看作是开口截面的梁肋,并考虑箱梁抗扭刚度引入修正系数  $\beta$ ,算出边肋的横向分配系数  $K$ ,然后乘以总的梁肋数。修正偏压法不区分正应力和剪应力,认为两者的偏心增大效应一致。其公式为:

$$\xi_r = n \times K_{\text{外}} \quad (3)$$

$$K_{\text{外}} = \frac{1}{n} + \beta \frac{e \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{l^2}{12} \times \frac{G}{E} \times \frac{I_k}{(C_w I) \sum a_i^2}} \quad (5)$$

式中: $\xi$  为箱梁偏载增大系数; $K_{\text{外}}$  为外侧腹板的荷载横向分布系数; $\beta$  为考虑截面抗扭作用的修正系数; $n$  为箱梁截面的腹板总数; $a_i$  为第  $i$  腹板至截面中心线的距离; $e$  为横向分布的车辆荷载合理点至截面中心线的距离; $l$  为连续梁中被考察的某跨跨长; $G$ 、 $E$  为主梁材料的抗剪、抗弯弹性模量; $I$ 、 $I_k$  为箱梁截面的抗弯和抗扭惯性矩; $C_w$  为按连续梁某跨跨中在集中荷载作用下的挠度与同等跨长的简支梁跨中挠度相等的原理进行刚度等效时的刚度修正系数。

## 3 该文简化计算方法及原理

箱梁截面上作用的任何偏心荷载都可分解为一个正对称荷载和一个扭转荷载(力偶作用)的组合,如图 1 所示。较多文献中对扭转荷载进行了二次分解,认为其除了产生周边扭转外,还产生畸变效应,如图 2 所示。该文在计算剪应力时考虑了箱梁桥弯曲剪应力以及扭转和畸变效应的影响,截面上任一点的剪应力由弯曲剪应力  $\tau_{\text{弯曲}}$ 、扭转剪应力  $\tau_{\text{扭转}}$  和畸变剪应力  $\tau_{\text{畸变}}$  组成。

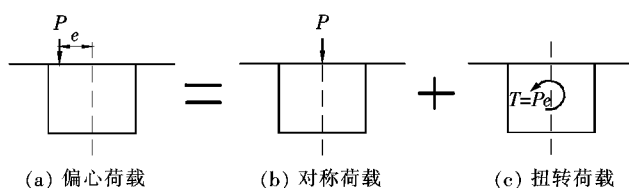


图 1 偏心荷载分解

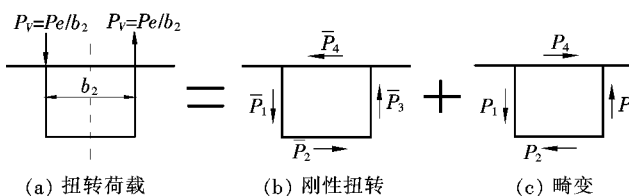


图 2 扭转荷载分解

### 3.1 箱梁的计算截面

箱梁截面通常为不规则形状,不利于截面特性的计算。该文中对箱梁截面进行了等效处理,将图 3 左半侧所示的不规则截面等效为图 3 右半侧所示的标准形式。等效过程中优先保证梁高一一致,取腹板最窄处的厚度为标准截面的腹板厚度  $t_2$ ,按照面积相等的原则确定顶板和底板的厚度  $t_1$  和  $t_3$ 。

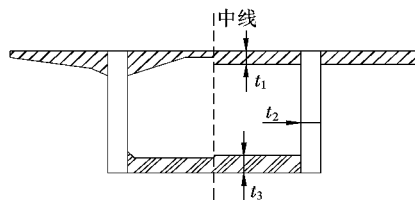


图 3 箱梁截面等效

### 3.2 箱梁截面弯曲剪应力计算

如图 4 所示,将闭口箱梁截面等效为开口工字形截面计算其腹板弯曲剪应力,计算公式如下:

$$\tau_{\text{弯曲}} = \frac{F_s S^*}{I t_2} \quad (6)$$

式中: $F_s$  为截面上的剪力; $I$  为对应中性轴的抗弯惯

性矩;  $t_2$  为腹板厚度;  $S^*$  为图 4(b) 中阴影部分面积对中性轴的静矩。

通常箱梁腹板厚度  $t_2$  远小于底板宽度  $b_2$ ,  $S^*$  主要由底板贡献, 弯曲剪应力在腹板上近似于均匀分布。由图 5 弯曲剪力流的分布可知, 箱梁腹板承担了截面上的全部剪力, 因此可采用剪力  $F_s$  除以腹板面积来近似计算弯曲剪应力, 计算公式如下:

$$\tau_{\text{弯曲}} = \frac{F_s}{2h_0 t_2} \quad (7)$$

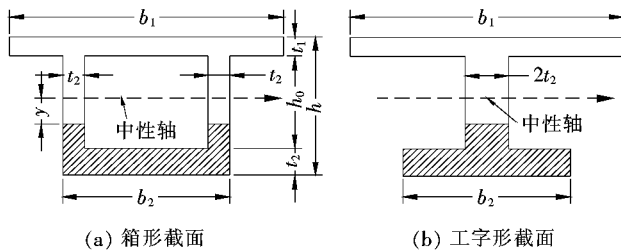


图 4 弯曲剪应力计算截面等效

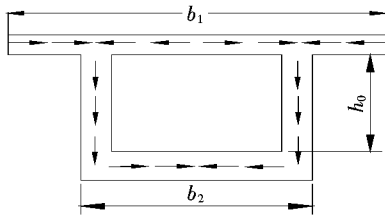


图 5 箱梁弯曲剪力流

式中:  $h_0$  为等效工形截面腹板高度。

### 3.3 箱梁截面扭转剪应力计算

箱梁桥的扭转大多为约束扭转, 相应的剪应力也由自由扭转剪应力以及约束扭转产生的二次剪应力两部分组成。大量文献研究结果表明: 箱梁截面自由扭转剪应力远大于二次剪应力, 因此该在计算扭转剪应力时忽略了二次剪应力的影响, 仅考虑自由扭转剪应力。

箱梁截面自由扭转的剪力流如图 6 所示。

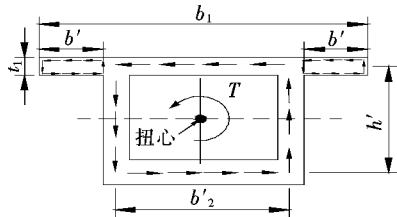


图 6 自由扭转剪力流分布

考虑箱梁翼缘板的影响, 截面抗扭惯性矩由箱室闭口部分  $I_{P1}$  与翼缘板开口部分  $I_{P2}$  组成。

箱室部分:

$$I_{P1} = 2h' b_2' \quad (8)$$

翼缘板部分:

$$I_{P2} = \left( 2 \times \frac{b' t_1^3}{3} \right) \quad (9)$$

式中:  $b'$ 、 $t_1$  分别为翼缘板的长度及厚度;  $h'$ 、 $b_2'$  分别为箱室的高度和宽度。

腹板扭转剪应力为:

$$\tau_{\text{扭转}} = \frac{T_P}{(I_{P1} + I_{P2}) t_2} \quad (10)$$

式中:  $T_P$  为计算断面上的扭矩。

### 3.4 箱梁截面畸变剪应力计算

按照文献[6]、[15]的假定, 当箱梁腹板为直腹板时, 图 2 中  $\bar{P}_i = P_i$  ( $i=1 \sim 4$ )。研究结果还表明: 畸变荷载产生的剪应力在腹板上为二次抛物线分布, 中性轴处的数值与扭转剪应力相差不大。鉴于简化计算的需要, 该文中畸变剪应力取与扭转剪应力相等的数值。

$$\tau_{\text{畸变}} = \tau_{\text{扭转}} \quad (11)$$

### 3.5 剪应力偏载系数简化计算公式

剪应力偏载系数由式(12)定义:

$$\beta_{\text{剪应力}} = \frac{\tau_{\text{弯曲}} + \tau_{\text{扭转}} + \tau_{\text{畸变}}}{\tau_{\text{弯曲}}} \quad (12)$$

将式(2)、(5)、(6)代入式(7), 得到:

$$\beta_{\text{剪应力}} = 1 + \frac{2h_0}{h_0' b_2' + (b' t_1^3)/3} \left( \frac{T_P}{F_s} \right) \quad (13)$$

对于单跨简支箱梁桥及多跨连续刚构桥, 各跨之间既不能传递扭矩也不能传递剪力, 有:

$$\frac{T_P}{F_s} = e \quad (14)$$

式中:  $e$  为活载作用点至顶板中线的距离, 即活载偏心距, 如图 1(a) 所示。

对于多跨连续箱梁桥, 各跨之间不能传递扭矩, 但可以传递剪力, 因此任意断面上扭矩  $T_P$  与剪力  $F_s$  存在以下关系:

$$\frac{T_P}{F_s} = \frac{F_P}{F_s} e \quad (15)$$

式中:  $F_P$  为将连续箱梁桥视为连续刚构桥时任意断面上的剪力。

## 4 不同方法的计算结果对比(以实桥为例)

为了进一步验证该文简化算法对于实桥剪应力偏载系数的预测能力, 选择 3 座已建预应力混凝土箱梁桥进行分析, 其主要设计参数见表 1。采用 4 种计算

方法对箱梁桥剪应力偏载系数进行计算,分别为修正偏压法、经验系数法、精细化数值模型以及该文简化计算方法,并对其计算结果进行对比以验证该文方法的有效性。

#### 4.1 车道布置及偏心距

3座桥梁的车道布置如图7所示,计算其荷载偏心距 $e$ (荷载合力中心线至箱梁截面中线的距离),结果见表1。

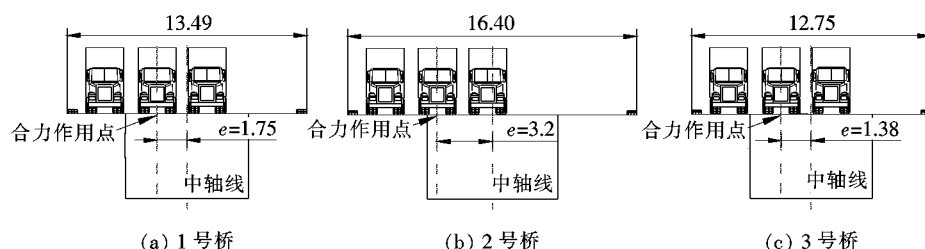


图7 不同桥梁的车道布置(单位:m)

表1 实桥(连续梁桥)主要设计参数

桥梁名称	跨径	顶板宽	底板宽	梁高	顶板厚	底板厚	腹板厚	偏心距 $e$
1号桥	80+150+80	13.50	7.50	3.5~8.7	0.30	0.32~0.90	0.5~0.9	1.75
2号桥	62+110+62	16.40	8.00	3.0~6.0	0.50	0.28~0.50	0.4~1.0	3.20
3号桥	50+85+50	12.75	6.25	5.0~2.4	0.28	0.28~0.75	0.5~1.0	1.38

注:① 偏心距 $e$ 为实桥车道荷载合力作用点到顶板中心线的距离,即合力偏心距;② 1、2、3号桥均为三车道。

#### 4.2 有限元模型

采用有限元软件 Abaqus 建立3座实桥的有限元模型(未网格细分前),如图8所示。对模型进行网格细分,单元的平均尺寸为0.5 m。采用三维实体单元(C3D8R),视混凝土为弹性材料。普通钢筋和预应力筋不单独模拟,通过提高混凝土的弹性模量计入其刚度效应。边界条件依据各桥实际情况设置。3座桥梁混凝土均为C50混凝土,弹性模量为3.45 GPa,考虑1.2的增大系数(计入钢筋和预应力的刚度效应),泊松比为0.3。

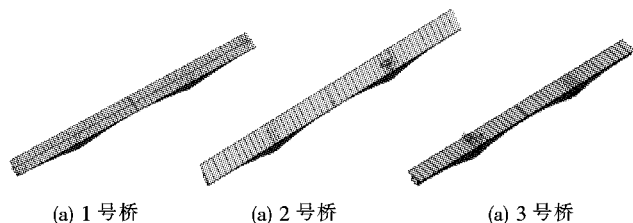


图8 有限元模型

#### 4.3 加载方式

在实桥中跨选取4个截面、边跨选取7个截面为控制截面,对不同的计算截面按照剪力影响线布置车道荷载(图9),分别计算偏心加载和对称加载下的腹板最大剪应力,并获取其对应的剪应力偏载增大系数。

4种方法预测的剪应力偏载系数见图10。

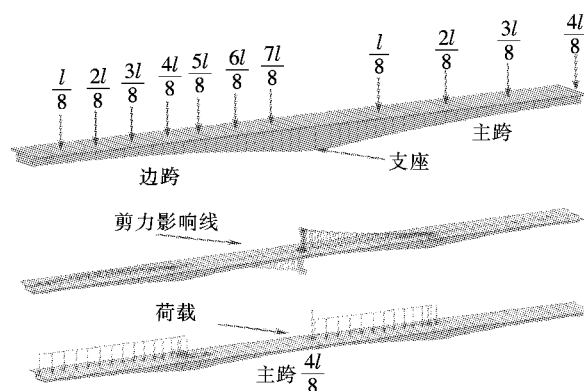
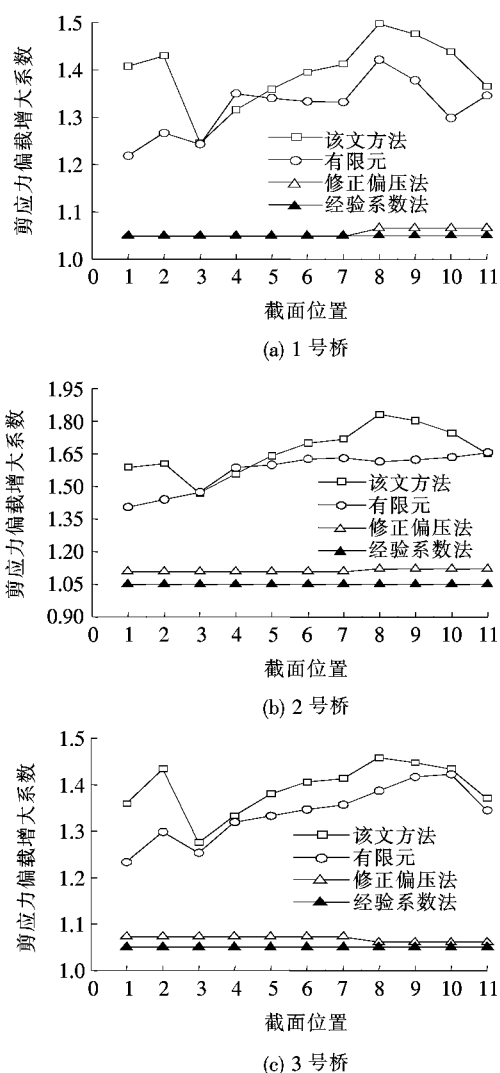


图9 基于控制截面的加载方式

图10表明:该文方法与数值方法计算的控制截面剪应力偏载系数较为接近,修正偏压法和经验系数法计算结果严重偏低。

## 5 结论

基于箱梁桥弯曲剪应力计算的一般方法以及薄壁杆件扭转和畸变的基本原理,通过适当的简化和等效处理,提出了适用于箱梁截面形式、且能够手算完成的剪应力偏载系数简化计算方法,并以3座实桥为对象,通过该文简化方法、有限元方法、修正偏压法及经验系数法的对比验证了该文方法的有效性和适用性,得到



注:① 1号桥截面2~8分别对应边跨 $l/8$ 、 $2l/8$ 、 $3l/8$ 、 $4l/8$ 、 $5l/8$ 、 $6l/8$ 、 $7l/8$ ,截面9、10、11,1分别对应中跨 $l/8$ 、 $2l/8$ 、 $3l/8$ 、 $4l/8$ ;② 2、3号桥截面1~7分别对应 $l/8$ 、 $2l/8$ 、 $3l/8$ 、 $4l/8$ 、 $5l/8$ 、 $6l/8$ 、 $7l/8$ ,截面8~11分别对应中跨 $l/8$ 、 $2l/8$ 、 $3l/8$ 、 $4l/8$ 。

图10 不同计算方法的结果对比

以下结论:

(1) 该文简化算法考虑了荷载偏心距、截面几何尺寸等因素对剪应力偏载系数的影响,计算结果与数值模拟结果较为一致,且计算过程简单,可以手算完成,适合在设计过程中对剪应力偏载系数进行快速计算。

(2) 经验系数法和修正偏压法并不适用于剪应力偏载系数的取值计算,该文两种方法对于剪应力偏载系数的计算结果严重偏低,且难以考虑不同控制截面

的差异性,在设计阶段留下了腹板主拉应力超限甚至开裂的隐患。

#### 参考文献:

- [1] 韦锋,杨洋,苏成,等.湖南地区混凝土刚构桥典型病害调查及分析[J].中外公路,2018(1).
- [2] 韩慧敏,白润波,徐宗美,等.移动荷载作用下梁损伤检测的数值模拟及试验研究[J].中外公路,2018(1).
- [3] 钟新谷.预应力混凝土连续箱梁桥裂缝防治与研究[R].第十三届全国结构工程学术会议特邀报告,2001.
- [4] JTG D62—2012 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [5] 舒小娟.变截面预应力混凝土箱梁桥空间效应研究[D].中南大学博士学位论文,2014.
- [6] 徐勋,叶华文,强士中.带悬臂板薄壁箱梁的扭转和畸变分析[J].铁道学报,2015(10).
- [7] 徐勋.大跨度混凝土箱梁结构空间效应研究[D].西南交通大学博士学位论文,2005.
- [8] 陈国强.连续宽箱梁的偏载增大系数的讨论[J].公路交通科技,2013(7).
- [9] 王勇,刘永健,唐小方.混凝土连续箱梁偏载系数简化算法研究[J].长沙交通学院学报,2006(3).
- [10] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [11] 胡肇滋.桥梁荷载横向分布的修正偏压法的研究[J].东北林学院学报,1985(1).
- [12] 程翔云,尚春青.对箱形截面连续梁活载内力增大系数公式的评述[J].公路,2000(1).
- [13] 交通部公路科学研究院.在用预应力混凝土连续梁、连续刚构桥箱梁裂缝调查报告[R],2007.
- [14] 常诚.现浇箱梁横向分布调整系数的实体有限元计算研究[J].中外公路,2018(5).
- [15] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [16] 马磊,万水,蒋正文.单箱多室波形钢腹板简支箱梁偏载系数的简化计算方法[J].公路交通科技,2017(2).
- [17] 彭崇梅,孙燕,张香.考虑裂缝开合效应的在役混凝土悬臂梁桥开裂影响研究[J].公路交通科技,2014(9).
- [18] 徐勋,强士中.薄壁箱梁畸变分析理论的研究[J].工程力学,2013(11).
- [19] 包启航.现浇单箱多室宽箱梁横梁受力特性研究[J].中外公路,2018(6).
- [20] 刘聪.基于刚性横梁法的简支斜梁桥主梁影响面研究[J].中外公路,2019(5).