

宽幅装配式箱梁桥荷载横向分布系数计算

邬晓光,魏俊杰

(长安大学公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要 目的 提出弹性支撑无推力框架计算方法,以提高宽幅装配式箱梁桥荷载横向分布系数计算的准确性与适用性。方法 通过计算装配式箱梁桥在单位荷载作用下的应变能,基于能量比拟原理,得到其对应的弹性支撑无推力框架及其刚度参数;再利用平面杆系有限元计算弹性支撑无推力框架柱的荷载横向分布系数,从而得到宽幅装配式箱梁桥各主梁的荷载横向分布系数;以贵州某一宽跨比为 0.87 的装配式箱梁桥为背景,分别采用 G-M 法、ANSYS 有限元数值方法、弹性支撑无推力框架算法计算,并与实桥荷载试验计算结果进行比较分析。结果 等效弹性支撑无推力框架计算得到的荷载横向分布系数与荷载试验法结果较为接近,误差在 10% 以内,与 G-M 法、ANSYS 有限元数值方法计算结果相比,不仅精确度高且更加方便高效。结论 等效弹性支撑无推力框架模型能准确计算大宽跨比装配式箱梁桥荷载横向分布系数,且对于一般宽跨比装配式箱梁桥具有较好的适用性,满足工程实际要求。

关键词 装配式桥梁;荷载横向分布;能量比拟原理;弹性支撑无推力框架;实体有限元

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Calculation of Load Transverse Distribution Coefficient of Wide Assembled Box Girder Bridge

WU Xiaoguang, WEI Junjie

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an, China, 710064)

Abstract: In order to improve the accuracy and applicability of the calculation of the load transverse distribution coefficient of the wide fabricated box girder bridge, the calculation method of the elastic braced non thrust frame is proposed. By calculating the strain energy of the assembled box girder bridge under unit load, based on the principle of energy analogy, the corresponding elastically supported non-thrust frame and its stiffness parameters are obtained. Then the transverse load distribution coefficients of elastically supported non-thrust frame columns are calculated by plane bar finite element method, and the transverse load distribution coefficients of the main girders

收稿日期:2019-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51778059);贵州省交通运输厅科技资助项目(2015-121-024-1);山西省交通运输厅科技资助项目(2017-1-37)

作者简介:邬晓光(1961—),男,教授,博士,主要从事桥梁结构分析和桥梁检测加固方面研究。

of the wide assembled box girder bridge are obtained. Taking an assembly box girder bridge with a width-span ratio of 0.87 in Guizhou as the background, the calculation methods of G-M method, ANSYS finite element method and elastically supported non-thrust frame method are adopted respectively. and compares with the results of load test of real bridge. The calculation results of equivalent elastically supported non-thrust frame are close to those of load test method, and the error is less than 10%. Compared with the results of G-M method and ANSYS finite element method, the calculation results of equivalent elastically supported non-thrust frame are more accurate, convenient and efficient. Equivalent elastically braced non-thrust frame model can accurately calculate the transverse load distribution coefficient of assembled box girder bridge with large width-span ratio, and it has good applicability for general assembled box girder bridge with wide-span ratio and meets the actual engineering requirements.

Key words: assembled bridge; load transverse distribution; energy analogy; elastic braced non thrust frame; solid finite element

装配式预制混凝土箱梁因其具有较大的抗弯刚度和抗扭刚度,在偏心活载作用下,受力均匀.相较于 T 梁和空心板梁,其具有较好的整体性和横向分布特性,在跨径 20 ~ 40 m 的城市高架桥和高等级公路桥梁中广泛使用^[1].

宽跨比较大的装配式箱梁具有明显的空间受力特性,但是通过内力和位移的假设,一般是将复杂的空间问题简化为平面问题,这也是荷载横向分布计算内力的基本原理^[2].常用的荷载横向分布计算理论主要有修正偏心压力法、G - M 法、刚接梁法和有限元法.但随着桥梁宽跨比的增大,修正偏心压力法和刚接梁法误差较大,不再适用于宽桥的荷载横向分布计算^[3].这时更多采用 G - M 法,然而 G - M 法需要查表,这一过程不仅增大工作量而且使得计算精度下降,不满足工程实际^[4].汤柯平等^[5]以成渝高速某大宽跨比 T 梁桥为原型,分析了现有各种计算方法的适用性.钱寅泉等^[6]采用空间有限元法对由 3 ~ 9 片主梁组成的小箱梁桥的荷载横向分布系数进行了研究,讨论了常见的 3 种近似计算方法的适用范围.周建庭等^[7]利用 ANSYS 有限元程序分析了不同宽跨比桥梁荷载横向分布系数,并对现有计算方法进行了修正.因此,宽幅装配式桥梁荷载横向分布系数的研究大都集中在数据分析后的修

正^[8-16],还需要进一步深入研究.基于此,笔者拟采用等效弹性支撑无推力框架模型计算宽跨比较大的装配式箱梁桥荷载横向分布系数,以贵州某大宽跨比装配式箱梁桥为依托工程,结合荷载试验结果论证方法的正确性,为实际工程计算提供参考.

1 理论分析

1.1 全桥挠曲面方程建立

在 $x = x_F$ 处作用单位荷载,第 s 号主梁顺桥向变形曲线为 $f_{x_F}(x)$,如图 1 所示.假设第 i 号主梁的变形曲线与第 s 号主梁相似,且相似关系沿纵桥向不发生变化,则装配式箱梁桥的挠曲面方程可表示为

$$w(x,y) = K(y) \cdot f_{x_F}(x) .$$

(1)

式中: $K(y)$ 为各片主梁挠曲线之间的相似关系,即荷载横向分布曲线.

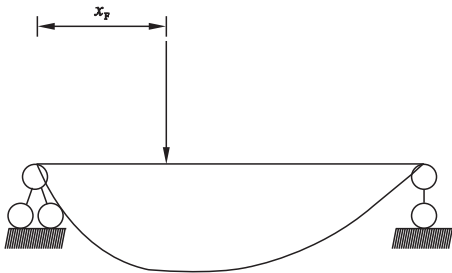


图 1 第 s 号主梁挠曲线

Fig. 1 Deflection curve of the No. s main beam

1.2 第 s 号梁在单位荷载作用下的挠曲线方程

距离第 s 号梁左端 x_F 的单位荷载可以当作分布于很小区间 ε 的均布荷载 p (见图2), 其中 s 可为任意梁号值, 荷载的函数表达式为

$$\begin{cases} p(x) = p, & x_F \leq x \leq x_F + \varepsilon; \\ p(x) = 0, & x < x_F \text{ 和 } x > x_F + \varepsilon. \end{cases} \quad (2)$$

它可用以下的正弦级数表示:

$$p(x) = \frac{2p}{l} \sum \sin \frac{n\pi x_F}{l} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (3)$$

则集中荷载作用下梁的挠度方程用级数可表示为

$$f_{x_F}(x) = \frac{2}{\pi^4} \cdot \frac{l^3}{EI_s} \sum \frac{1}{n^4} \sin \frac{n\pi x_F}{l} \cdot \sin \frac{n\pi x}{l}. \quad (4)$$

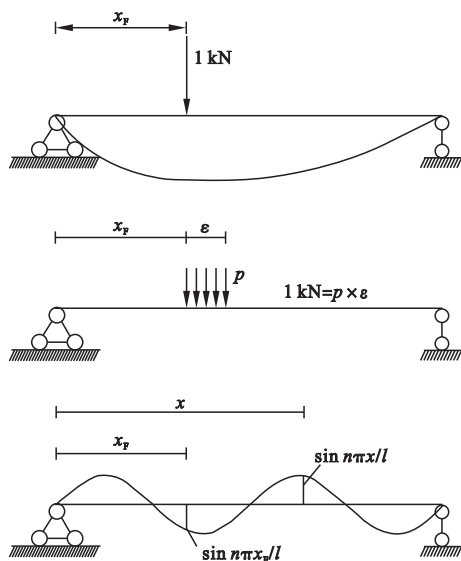


图2 用正弦荷载表示集中荷载

Fig. 2 The concentrated load expressed by sinusoidal load

根据文献[2], $f_F(x)$ 取级数的首项时与精确值的误差为 1.5%, 对于挠度的计算, 用半波正弦荷载已达到相当准确的程度. 因此, 将 $x = x_F$ 处单位荷载表示为一个半波正弦荷载:

$$p(x) = \frac{2p}{l} \sin \frac{\pi x_F}{l} \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (5)$$

那么其挠曲线方程也为半波正弦曲线:

$$f_{x_F}(x) = \frac{2l^3}{\pi^4 EI_s} \cdot \sin \frac{\pi x_F}{l} \cdot \sin \frac{\pi x}{l}. \quad (6)$$

1.3 全桥能量等式推导

装配式箱梁桥由 n 根主梁组成. 由于箱梁抗扭刚度大, 横向传力性能好, 一般只在支点和跨中设置横隔板. 全桥坐标系如图3所示.

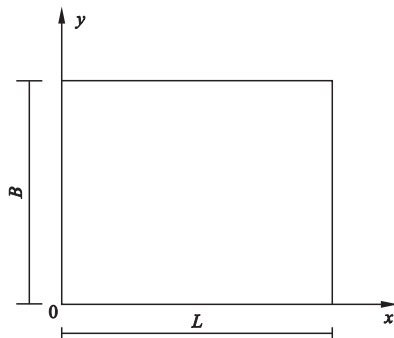


图3 全桥坐标系

Fig. 3 The coordinate system of full bridge

(1) 主梁弯曲应变能计算

根据初等梁理论, 当梁的跨高比大于 10 时, 梁的剪切应变能可以忽略不计. 第 i 号梁在单位荷载作用下的应变能为

$$\begin{aligned} u_i &= \frac{1}{2} \int_0^l EI_i \cdot K^2(y_i) \left[\frac{d^2 f_{x_F}(x)}{dx^2} \right]^2 dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l \frac{I_i}{I_s} \cdot K^2(y_i) EI_s \left[\frac{d^2 f_{x_F}(x)}{dx^2} \right]^2 dx = \\ &= \frac{1}{2} \frac{I_i}{I_s} K^2(y_i) f_{x_F}(x_F). \end{aligned} \quad (7)$$

n 根主梁在单位荷载作用下的弯曲应变能为

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_s} K^2(y_i) f_{x_F}(x_F) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{I_s} \cdot \frac{1}{f_{x_F}(x_F)} \cdot w^2(x_F, y_i). \end{aligned} \quad (8)$$

式中: I_i 为第 i 号主梁的抗弯惯性矩; I_s 为第 s 号主梁的抗弯惯性矩.

(2) 主梁扭转应变能计算(包括桥面板)

装配式箱梁桥在单位偏心荷载作用下各主梁会发生不同程度的扭转. 根据挠曲面方程可推得 $x = x_F$ 时的横截面挠曲线方程为

$w(x_F, y)$, 因此各主梁的扭转角为 $\frac{\partial w(x_F, y_i)}{\partial y}$, 并假设相应扭矩大小为 T_{iF} .

由于桥跨结构的扭转在支座处受约束, 第 i 号主梁计算简图如图4~图6所示, 其反力扭矩和内力由材料力学可求得:

$$\begin{cases} T_{iA} = \frac{T_{iF}(l - x_F)}{l}, \\ T_{iB} = \frac{T_{iF}x_F}{l}. \end{cases} \quad (9)$$

笔者按箱梁自由扭转计算, 且不考虑箱梁畸变. 参考文献[17], 闭口箱型截面单位长度相对扭转角 θ' 与外扭矩的关系式为

$$\theta' = \frac{TS}{4GA_0^2\delta}. \quad (10)$$

其中, T 为截面扭矩大小; S 为壁厚中线全长; G 为截面剪切模量; A_0 为壁厚中线所围面积; δ 为箱梁壁厚.

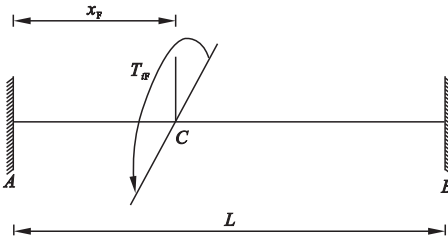


图4 第 i 号主梁扭转示意图

Fig. 4 The torsion diagram of No. i main girder

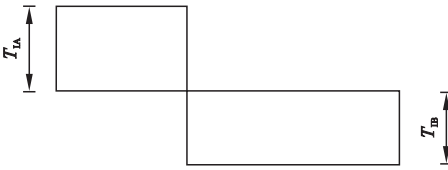


图5 第 i 号主梁扭矩大小示意图

Fig. 5 The torque diagram of No. i main girder

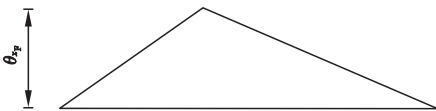


图6 第 i 号主梁各截面扭转角分布图

Fig. 6 The distribution diagram of torsion angles in the sections of No. i main girder

如图5和图6所示, 由于 AC 段和 CB 段扭矩大小不变, 则扭转角在 AC 段和 CB 段呈线性变化, 且在 C 截面相等. 则 C 截面扭转角大小为

$$\theta_{AC} = \theta_{CB} = \int_0^{x_F} \theta' dx = \frac{T_{iA}Sx_F}{4GA_0^2\delta} = \frac{\partial w(x_F, y_i)}{\partial y}. \quad (11)$$

因此, 第 i 号箱梁的扭转应变能用相对扭转角可以表示为

$$u'_i = \frac{GI_p}{2x_F} \theta_{AC}^2 + \frac{GI_p}{2(l - x_F)} \theta_{CB}^2 = \frac{lGI_{iP}}{2x_F(l - x_F)} \times \left[\frac{\partial w(x_F, y_i)}{\partial y} \right]^2. \quad (12)$$

n 根主梁在单位荷载作用下的扭转应变能为

$$U_2 = \sum_{i=1}^n \frac{lGI_{iP}}{2x_F(l - x_F)} \left[\frac{\partial w(x_F, y_i)}{\partial y} \right]^2. \quad (13)$$

式中: I_{iP} 为第 i 号箱梁截面抗扭惯性矩.

(3) 桥面板横向弯曲应变能计算

$$\begin{aligned} U_3 &= \frac{1}{2} \int_0^B \int_0^L ED \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 dx dy = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^B \int_0^L ED \left[\frac{d^2 K(y)}{dy^2} \right]^2 f_{x_F}^2(x) dx = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^B ED \frac{\int_0^L f_{x_F}^2(x) dx}{f_{x_F}^2(x_F)} \left[\frac{\partial^2 w(x_F, y)}{\partial y^2} \right]^2 dy. \end{aligned} \quad (14)$$

式中: D 为桥面板顺桥向单位宽度抗弯惯性矩.

(4) 隔隔板横向弯曲应变能

由挠曲面方程可推得跨中截面的横向挠曲线方程为 $w(l/2, y)$, 支点截面不发生横向挠曲. 因此根据初等梁理论可求得跨中横隔板的横向弯曲应变能为

$$\begin{aligned} U_4 &= \frac{1}{2} \int_0^B EI_b \left[\frac{\partial^2 w(l/2, y)}{\partial y^2} \right]^2 dy = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^B EI_b \left\{ \frac{\partial^2 [f_{x_F}(l/2) K(y)]}{\partial y^2} \right\}^2 dy = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^B EI_b f_{x_F}^2(l/2) \left[\frac{\partial^2 K(y)}{\partial y^2} \right]^2 dy = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^B EI_b \frac{f_{x_F}^2(l/2)}{f_{x_F}^2(x_F)} \left[\frac{\partial^2 w(x_F, y)}{\partial y^2} \right]^2 dy. \end{aligned} \quad (15)$$

式中: I_b 为中横隔板横向抗弯惯性矩.

(5) 横隔板横桥向扭转应变能

在 $x = x_m$ 处横隔板的横桥向扭转角表达式为

$$\frac{\partial w(x_m, y)}{\partial x} = f'_{x_F}(x_m) K(y) = \frac{2l^2}{\pi^3 EI_s} \sin \frac{\pi x_F}{l} \cos \frac{\pi x_m}{l} \cdot K(y). \quad (16)$$

当 $x = l/2$ 时, 扭转角为 0; 当 $x = 0$ 时, 扭转角为 $\frac{2l^2}{\pi^3 EI_s} \sin \frac{\pi x_F}{l} K(y)$, 则端横隔板扭转角表达式为

$$\varphi = f'_{x_F}(0) \cdot K(y). \quad (17)$$

同理可得 $x = l$ 时的端横隔板扭转角表达式为

$$\varphi = -f'_{x_F}(0) \cdot K(y). \quad (18)$$

因此, 中横隔板扭转应变能为 0, 只有两端横隔板发生扭转, 且大小相等. 端横隔板的扭转受力如图 7 所示, 与计算主梁纵向扭转应变能一样, 同理可证明长度 y_F 段和 $B - y_F$ 段的扭矩大小不发生变化, 扭转角呈线性变化, 在 $y = y_F$ 截面相等. 第 i 号主梁横隔板的相对扭转角可表示为

$$\varphi_i = \frac{T_i d}{GJ^c} = f'_{x_F}(0) K(y_i). \quad (19)$$

式中: T_i 为第 i 号主梁端横隔板顺桥向扭矩大小; J^c 为端横隔板的横桥向抗扭惯性矩; d 为第 i 号主梁横隔板的横桥向长度.

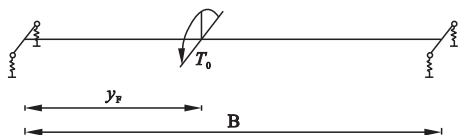


图 7 端横隔梁扭转受力示意图

Fig. 7 Diagram of torsion force at the end of diaphragm beam

第 i 号主梁端横隔梁的扭转应变能为

$$U_{5i} = \frac{GJ^c}{2d} f_{x_F}^{\prime 2}(0) K^2(y_i) = \frac{GJ^c}{2d} f_{x_F}^{\prime 2}(0) \frac{w^2(x_F, y_i)}{f_{x_F}^2(x_F)}. \quad (20)$$

因此, 两端端横隔板的横桥向扭转应变

能为

$$U_5 = \sum_{i=1}^n \frac{GJ^c}{d} \frac{f_{x_F}^{\prime 2}(0)}{f_{x_F}^2(x_F)} w^2(x_F, y_i). \quad (21)$$

(6) 全桥能量等式

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i w^2(x_F, y_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n GJ_i \cdot \left[\frac{\partial w(x_F, y_i)}{\partial y} \right]^2 + \frac{1}{2} \int_0^B EI^* \left[\frac{\partial^2 w(x_F, y)}{\partial^2 y} \right]^2 dy. \quad (22)$$

其中,

$$\begin{cases} C_i = \frac{I_i}{I_s} \cdot \frac{1}{f_{x_F}(x_F)} + \frac{2GJ^c}{d} \cdot \frac{f_{x_F}^{\prime 2}(0)}{f_{x_F}^2(x_F)}, \\ J_i = \frac{I_{ip}}{x_F(l - x_F)}, \\ I^* = I_b \frac{f_{x_F}^2(l/2)}{f_{x_F}^2(x_F)} + D \frac{\int_0^l f_{x_F}^2(x) dx}{f_{x_F}^2(x_F)}. \end{cases} \quad (23)$$

1.4 弹性支撑无推力框架能量等式推导

在 $x = x_F$ 处建立如图 8 所示的平面无推力框架结构. 此时, 柱底为可视为滑动固端约束. 因此, 柱不受剪力, 为纯弯构件, 可以将柱视为限制框架梁变形的扭转弹簧. 弹性支撑无推力框架在荷载作用下的能量由梁的弯曲应变能、柱的弯曲应变能和压缩应变能组成. 设框架中梁的抗弯刚度为 EI' , 柱的抗压刚度为 EA'_i , 抗弯刚度为 EI''_i , 柱的高度为 h_i . 框架在 $y = y_F$ 处作用单位力时的挠曲线为 $w(x_F, y)$, 则可求出框架的应变能.

框架中柱的压缩应变能:

$$U'_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n EA'_i h_i \left[\frac{w(x_F, y_i)}{h_i} \right]^2. \quad (24)$$

框架中柱的弯曲应变能:

$$U'_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{EI''_i}{h_i} \left[\frac{dw(x_F, y_i)}{dy} \right]^2. \quad (25)$$

框架中梁的弯曲应变能:

$$U'_3 = \frac{1}{2} \int_0^B EI' \left[\frac{d^2 w(x_F, y)}{d^2 y} \right]^2 dy. \quad (26)$$

弹性支撑的无推力框架在 $y = y_F$ 处作用单位荷载时的能量为

$$U' = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n EA_i' h_i \left[\frac{w(x_F, y_i)}{h_i} \right]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{EI_i''}{h_i} \left[\frac{dw(x_F, y_i)}{dy} \right]^2 + \frac{1}{2} \int_0^B EI' \left[\frac{d^2 w(x_F, y)}{d^2 y} \right]^2 dy. \quad (27)$$

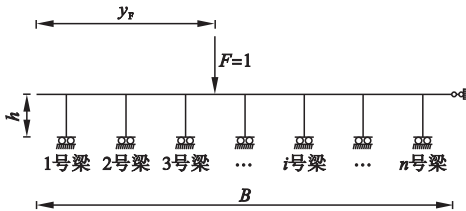


图 8 无推力刚架模型图

Fig. 8 Model diagram of non-thrust rigid frame

1.5 宽幅装配式桥梁荷载横向分布计算

不难发现式(22)和式(27)具有相同的形式,即弹性支撑无推力框架在荷载作用下的能量表达式和宽幅装配式箱梁桥的全桥能量表达式存在相似关系.参考文献[18]中的能量比拟解法,得到无推力框架梁的抗弯刚度 EI' 、框架柱的抗弯刚度 EI_i'' 、框架柱的抗压刚度 EA_i' 分别和装配式箱梁广义抗弯刚度 EI^* 、箱梁广义抗扭刚度 GJ_i 、箱梁广义抗压刚度 C_i 的相似关系.因此,利用能量比拟原理将宽幅装配式箱梁桥与弹性支撑无推力框架建立比拟关系,从而弹性支撑无推力框架的荷载横向分布计算就可以用来计算宽幅装配式箱梁桥的荷载横向分布系数.弹性支撑无推力框架等效截面参数可以表示为

$$\begin{cases} A_i' = \frac{C_i h_i}{E}, \\ I_i'' = \frac{GJ_i h_i}{E}, \\ I' = I^*. \end{cases} \quad (28)$$

将式(23)代入式(28)得:

$$\begin{cases} A_i' = \frac{I_i h_i \pi^4}{2l^3 \sin^2 \frac{\pi x_F}{l}} + \frac{2GJ_i h_i \pi^2}{Edl^2 \sin^2 \frac{\pi x_F}{l}}, \\ I_i'' = \frac{Gh_i}{E} \cdot \frac{I_{ip}}{x_F(l-x_F)}, \\ I' = \frac{2I_b + Dl}{2 \sin^2 \frac{\pi x_F}{l}}. \end{cases} \quad (29)$$

当荷载作用在跨中 $x_F = l/2$ 时,为简化计算,令框架柱高度 $h_i = 1$ m,弹性支撑无推力框架的截面参数可以进一步简化为

$$\begin{cases} A_i' = \frac{I_i \pi^4}{2l^3} + \frac{2GJ_i \pi^2}{Edl^2}, \\ I_i'' = \frac{4GI_{ip}}{El}, \\ I' = \frac{2I_b + Dl}{2}. \end{cases} \quad (30)$$

同理,当荷载作用于 $x_F = l/4$ 时,框架截面参数可以简化为

$$\begin{cases} A_i' = \frac{I_i \pi^4}{l^3} + \frac{4GJ_i \pi^2}{Edl^2}, \\ I_i'' = \frac{16GI_{ip}}{3El}, \\ I' = 2I_b + Dl. \end{cases} \quad (31)$$

因此,利用截面参数建立弹性支撑无推力框架进行荷载横向分布系数计算,进而得到宽幅装配式箱梁桥的荷载横向分布系数.

2 算例分析

贵州某 10 梁式后张预应力混凝土简支小箱梁桥,桥宽 30 m,跨径 35 m,桥梁宽跨比 0.87,主梁采用 C50 混凝土,截面参数如表 1 所示,小箱梁构造尺寸如图 9 所示.

表 1 截面参数

Table 1 Section parameter

截面类型	截面抗弯	截面抗扭
	惯性矩/m ⁴	惯性矩/m ⁴
中梁截面	0.669 5	0.566 21
边梁截面	0.686 5	0.568 21
横梁截面	0.160 4	0.193 81

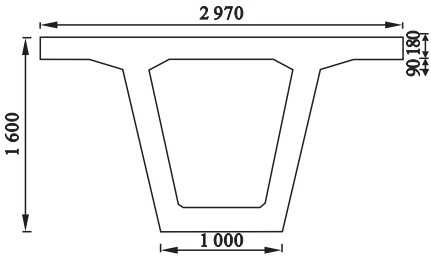


图 9 小箱梁截面图

Fig. 9 Section diagram of small box girder

利用式(30)和(31)计算荷载作用在跨中时等效弹性支撑无推力框架的截面参数如表2所示。

表2 弹性支撑无推力框架截面参数

Table 2 Section parameters of non-thrust frame with elastic support

截面类型	框架柱截面	框架柱截面	框架梁截面
	面积 A'_i/cm^2	抗弯惯矩 I'_i/m^4	抗弯惯矩 I''_i/m^4
边梁跨中截面	24.608 1	0.031 59	0.167 69
中梁跨中截面	24.301 4	0.031 48	0.167 69
边梁 L/4 截面	49.216 2	0.042 12	0.335 38
中梁 L/4 截面	48.602 8	0.041 97	0.335 38

实桥荷载试验在各梁梁底布置挠度测点,利用公式 $m = nf_i / \sum_{i=1}^{10} f_i$ 计算实桥各主梁的荷载横向分布系数^[19]. 其中, n 为车道数, f_i 为第 i 号梁的实测挠度. 各计算方法均考虑偏载两列车后轮作用于跨中的情况,具体布置如图10和图11所示. 同时建立有限元模型,按加载工况布置车辆,利用数值方法计算荷载横向分布系数,有限元建模采用 ANSYS 实体单元 solid65 进行梁单元模拟,通过材料参数的定义对实桥进行精确模拟,模型见图12.

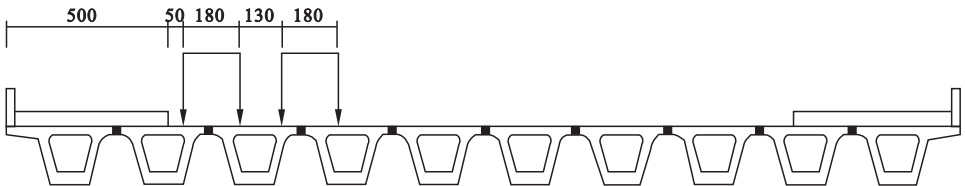


图10 车辆横向布置图

Fig. 10 Arrangement of deflection measuring points in cross section

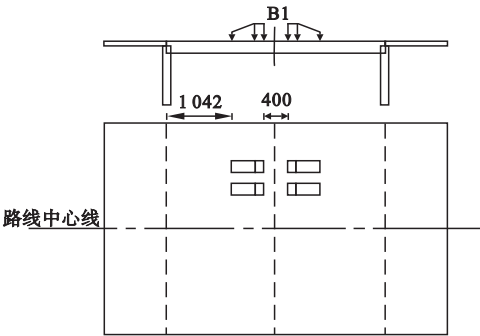


图11 荷载试验车布置图

Fig. 11 Load layout with test vehicle

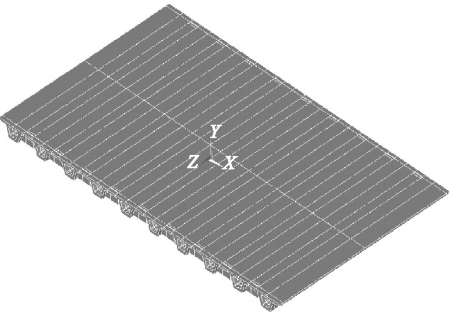


图12 ANSYS 全桥实体模型

Fig. 12 Solid model of the whole bridge with

ANSYS

表3和表4分别给出了跨中偏载工况下,各主梁的荷载横向分布系数(结构对称,表中仅给出5片),包括传统的G-M法、弹性支撑无推力框架法、有限元数值方法与荷载试验法.以荷载试验结果计算得到的荷载横向分布系数为基准,计算其他几种方法相对于荷载试验法的误差,如表5、表6和表7所示.

表3 跨中截面荷载横向分布系数计算结果

Table 3 Calculation results of transverse load distribution coefficient of mid-span section

计算方法	荷载横向分布系数				
	梁1	梁2	梁3	梁4	梁5
GM法	0.326	0.333	0.329	0.287	0.282
弹性支撑无推力框架法	0.234	0.331	0.382	0.354	0.260
有限元法	0.245	0.310	0.355	0.317	0.249
荷载试验法	0.227	0.324	0.367	0.340	0.253

表 4 $L/4$ 截面荷载横向分布系数计算结果

Table 4 Calculation results of transverse load distribution coefficient of $L/4$ section

计算方法	荷载横向分布系数				
	梁 1	梁 2	梁 3	梁 4	梁 5
GM 法	0.326	0.333	0.329	0.287	0.282
弹性支撑无 推力框架法	0.264	0.320	0.368	0.353	0.271
有限元法	0.266	0.309	0.347	0.315	0.256
荷载试验法	0.248	0.324	0.355	0.334	0.260

表 5 跨中截面各方法计算结果相对于荷载试验法的误差

Table 5 Comparision results between mid-span section method and the load test method

计算方法	荷载横向分布系数计算相对误差/%				
	梁 1	梁 2	梁 3	梁 4	梁 5
GM 法	43.61	2.78	-10.35	-15.59	11.46
弹性支撑无 推力框架法	3.08	2.16	4.09	4.12	2.77
有限元法	7.93	-4.32	-3.27	-6.76	-1.58

表 6 $L/4$ 截面各方法计算结果相对于荷载试验法的误差

Table 6 Comparision results between $L/4$ section method and the load test method

计算方法	荷载横向分布系数计算相对误差/%				
	梁 1	梁 2	梁 3	梁 4	梁 5
GM 法	31.45	2.78	-7.32	-14.07	8.46
弹性支撑无 推力框架法	6.45	-1.23	3.66	5.69	4.23
有限元法	7.26	-4.63	-2.25	-5.69	-1.54

表 7 $L/4$ 截面相对于跨中截面的荷载横向分布系数误差

Table 7 Comparision results of load transverse distribution coefficient between mid-span section method and $L/4$ section method

计算方法	荷载横向分布系数计算相对误差/%				
	梁 1	梁 2	梁 3	梁 4	梁 5
弹性支撑无 推力框架法	12.8	-3.32	-3.66	-0.28	0.04
有限元法	8.57	-0.32	-2.25	-0.63	2.81
荷载试验法	9.25	0	-3.27	-1.76	2.77

从表 5 和表 6 可以看出:①G-M 法计算的荷载横向分布系数误差最大,最高达 43.61%,且误差值波动较大.②弹性支撑无推力框架法计算误差较小,与实桥荷载试验结果接近,误差在 10% 以内且偏于安全,这是因为笔者充分考虑了各主梁之间弹性连接刚度对荷载横向分布的影响.③ANSYS 实体单元有限元模拟与荷载试验结果误差小,均在 10% 以内,验证了实体单元建模的正确性.但是,计算结果较荷载试验结果偏小.④由表 7 可知跨中荷载横向分布系数与 $L/4$ 跨荷载横向分布系数较为接近,误差在 15% 以内.

为验证笔者方法对于宽跨比小于 0.5 的窄桥的适用性,以文献[20]中例 2-3-4 为算例,分别采用修正偏心压力法、G-M 法和弹性支撑无推力框架法方法进行计算分析,结果如图 13 和表 8 所示.

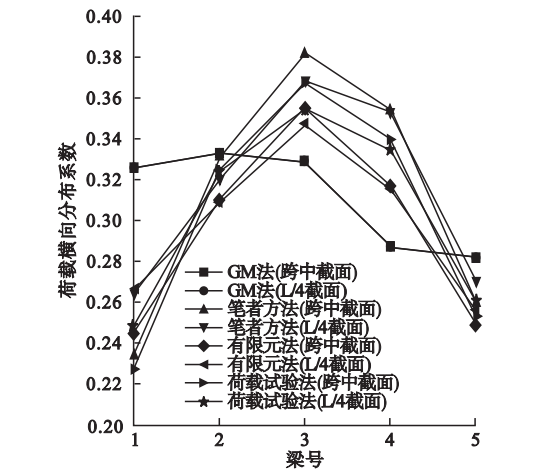


图 13 荷载横向分布系数计算结果

Fig. 13 Calculation results of load transverse distribution coefficient

表 8 横向分布系数计算结果

Table 8 Calculation results of transverse distribution coefficient

计算方法	荷载横向分布系数		
	梁 1	梁 2	梁 3
修正偏心压力法	0.529	0.464	0.400
G-M 法	0.506	0.454	0.410
弹性支撑无推力框架法	0.524	0.460	0.406

当桥梁宽跨比小于 0.5 时,偏心压力法具有很高的精确度^[2]. 因此,以修正偏心压力法为基准,比较弹性支撑无推力框架法和 G-M 法的误差绝对值,如表 9 所示.

表 9 各计算方法的计算误差

Table 9 Computational errors of proposed methods

计算方法	荷载横向分布系数计算相对误差/%		
	梁 1	梁 2	梁 3
弹性支撑无推力框架法	-0.9	-0.9	1.5
G-M 法	-4.3	-2.2	2.5

由表 9 可知,利用弹性支撑无推力框架法计算的小宽跨比装配式桥荷载横向分布系数比 G-M 法更加精确,说明弹性支撑无推力框架解法同样适合于小宽跨比桥梁.

3 结 论

(1)笔者利用能量比拟原理,将宽幅装配式箱梁桥等效为弹性支撑的无推力框架,提出了宽幅装配式桥荷载横向分布系数的弹性支撑无推力框架解法,且同样适用于小宽跨比装配式桥梁荷载横向分布系数的计算,笔者方法计算结果与实桥荷载试验结果误差较小,满足工程实际要求.

(2)笔者假设荷载横向分布曲线沿纵向不发生变化,并据此建立空间挠曲面方程.根据初等梁理论推导了全桥各构件在单位荷载作用下的能量表达式,并考虑了主梁抗扭刚度和抗弯刚度、横隔梁的横向抗弯刚度和横向抗扭刚度以及桥面板横向抗弯刚度对荷载横向分布的影响,充分考虑了各主梁之间的横向弹性连接刚度.

(3)通过有限元计算和荷载试验结果分析,跨中与 $L/4$ 跨荷载横向分布系数较为接近,最大误差为 12.8%,进一步证明了荷载横向分布曲线沿纵桥向不发生变化的假设.

(4)采用能量法推导全桥能量等式,荷载挠度曲线方程仅取了级数首项,致使其有一定的偏差,但满足工程精度要求.

参考文献

[1] 钱若霖,苏佩,邬晓光.考虑畸变变位的多梁式小箱梁桥横向分布计算[J].铁道科学与工程学报,2018,15(9):2270-2275.
(QIAN Ruolin, SU Pei, WU Xiaoguang. Calculation method of transverse distribution of multi-beam small box girder bridge with distorted displacement [J]. Journal of railway science and engineering, 2018, 15(9): 2270 - 2275.)

[2] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2017.
(FAN Lichu. Bridge engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2017.)

[3] 聂瑞锋,石雪飞,阮欣,等.在役多车道空心板梁桥弯矩横向分布系数计算方法研究[J].桥梁建设,2014,44(2):56-60.
(NIE Ruifeng, SHI Xuefei, RUAN Xin, et al. Research of calculation method for moment lateral distribution factors of multi-lane hollow slab beam bridges in service [J]. Bridge construction, 2014, 44(2): 56 - 60.)

[4] 陈强,孟阳君,周先雁.大宽跨比桥梁横向分布系数的快速计算方法[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(6):1287-1289.
(CHEN Qiang, MENG Yangjun, ZHOU Xianyan. Rapid computation method of traverse distribution coefficients about bridges with big wide-span ratio [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2011, 30 (6): 1287 - 1289.)

[5] 汤柯平.宽幅预应力混凝土 T 梁桥荷载横向分布研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
(TANG Keping. Research on load transverse distribution for wide prestressed concrete T beam bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.)

[6] 钱寅泉,周正茂,王素娟,等.装配式小箱梁桥荷载横向分布数值分析与试验[J].公路交通科技,2012,29(1):86-90.
(QIAN Yinquan, ZHOU Zhengmao, WANG Sujuan, et al. Numerical and experiment of lateral load distribution of fabricated small box girder bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2012, 29(1): 86 - 90.)

[7] 周建庭,蓝勇,袁瑞,等.大宽跨比整体简支板桥合理简化计算模式探讨[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(6):991-994.
(ZHOU Jianting, LAN Yong, YUAN Rui, et al. Reasonably simplified calculation model of integral simple supported slab bridge with large width-span ratio [J]. Journal of Chongqing jiaotong university (natural science), 2009, 28(6): 991 - 994.)

[8] 钱若霖.在役装配式梁桥横向分布计算方法

- 及参数影响研究[D]. 西安:长安大学,2018.
(QIAN Ruolin. Study on calculation method and parameter influence of transverse distribution of inservice assembly beam bridge [D]. Xi'an:Chang'an University,2018.)
- [9] 马磊,章勇,万水,等. 单箱多室波形钢腹板PC组合箱梁荷载横向分布[J]. 长安大学学报(自然科学版),2017,37(1):85-92.
(MA Lei, ZHANG Yong, WAN Shui, et al. Load transverse distribution of single box multi-cell PC composite girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2017, 37 (1): 85-92.)
- [10] 王柏瓔. 钢筋混凝土梁桥横向分布及服役状态评价方法研究[D]. 长春:吉林大学,2015.
(WANG Baiying. Research on evaluation approach of lateral distribution and in-service condition for reinforced concrete bridge [D]. Changchun:Jilin University,2015.)
- [11] LIU Hanbing, WANG Baiying, WANG Xianqiang, et al. Calculation of bridge transverse load distribution coefficient based on generalized rigid cross-beam method [J]. Advanced materials research,2013,694-697;3164-3167.
- [12] CHEN Jihao, ZHAO Shunbo, YAO Jitao. The connection form of new-built and existing bridge effect on transverse distribution of vehicle load[J]. Advanced materials research, 2011,250-253;3008-3011.
- [13] 郭晓光,李院军,时元绪,等. 装配式空心板梁桥铰缝损伤评估方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(4):637-644.
(WU Xiaoguang, LI Yuanjun, SHI Yuanxu, et al. Damage assessment method for hinged joint of fabricated hollow slab girder bridge [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019,35(4):637-644.
- [14] 李院军,郭晓光,黄成,等. 考虑主梁损伤的装配式梁桥荷载横向分布系数计算[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(6):1459-1465.
(LI Yuanjun, WU Xiaoguang, HUANG Cheng, et al. Calculation of transverse load distribution coefficient of assembled girder bridge considering main girder damage [J]. Journal of railway science and engineering, 2019, 16 (6):1459-1465.)
- [15] 战家旺,高胜星,闫宇智,等. 基于模型修正的公路简支板梁桥荷载横向分布系数计算方法[J]. 中国公路学报,2019,32(5):72-79.
(ZHAN Jiawang, GAO Shengxing, YAN Yuzhi, et al. A calculation method for transverse load distribution coefficient of highway simply-supported slab-girder bridges based on model updating [J]. China journal of highway and transport, 2019,32(5):72-79.)
- [16] 罗征,王银辉,金辉. 型钢-混凝土组合加固装配式空心板梁桥铰缝破坏模式及工作性能研究[J]. 世界桥梁,2018,46(6):82-87.
(LUO Zheng, WANG Yinhui, JIN Hui. Study of failure mode and working performance of hinge joints strengthened by combined use of section steel and concrete in assembled hollow slab bridge [J]. World bridge, 2018, 46 (6): 82-87.)
- [17] 孙训方,方孝淑,关来泰. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
(SUN Xunfang, FANG Xiaoshu, GUAN Laitai. Mechanics of materials [M]. Beijing: Higher Education Press,2001.)
- [18] 刘清. 波形钢腹板组合箱梁横向内力理论及试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
(LIU Qing. Theoretical and experimental study on the transverse internal force of the composite box girder with corrugated steel webs [D]. Changsha:Hu'nan University,2009.)
- [19] 郭晓光,钱若霖,苏佩. 考虑刚度损伤的装配式T梁桥横向分布计算[J]. 公路交通科技, 2018,35(6):61-66.
(WU Xiaoguang, QIAN Ruolin, SU Pei. Calculation of transverse distribution of assembled T-beam bridge considering stiffness damage [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2018, 35(6):61-66.)
- [20] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 北京:人民交通出版社,2017.
(SHAO Xudong. Bridge engineering [M]. Beijing:China Communications Press,2017.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)