

考虑滑移的多梁式组合小箱梁桥荷载横向分布

项贻强¹, 何余良^{1,2}, 刘丽思¹, 刘成熹¹

(1. 浙江大学 土木工程系, 310058 杭州; 2. 杭州市市政公用建设开发公司, 310009 杭州)

摘要: 为获得多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥荷载横向分布系数计算公式, 本文考虑其界面滑移效应, 分别对传统的偏心压力法、修正偏心压力法、刚接梁法计算公式进行修正, 并用所提出的各修正方法对一座典型的多梁式钢-混组合小箱梁桥的荷载横向分布进行计算. 将修正理论算法计算所得结果与经试验验证有限元方法计算结果进行比较. 结果表明, 考虑滑移修正的刚接梁法适用于计算多梁式钢-混组合小箱梁桥的跨中荷载横向分布系数, 当满足窄桥条件时, 则可采用更为简洁的考虑滑移修正的偏心压力法进行计算. 同时, 在进行多梁式钢-混组合小箱梁桥设计时, 为减少桥梁的偏载效应, 建议适当加强横向连接的钢横梁刚度, 采用不完全剪力连接形式.

关键词: 桥梁工程; 钢-混凝土组合; 多梁式箱梁; 荷载横向分布; 滑移效应

中图分类号: TU411; TU443.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)08-0113-06

Lateral load distribution of multi-box steel-concrete composite girder bridges for considering slipping effect

XIANG Yi-qiang¹, HE Yu-liang^{1,2}, LIU Li-si¹, LIU Cheng-xi¹

(1. Dept. of Civil Engineering, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China; 2. Hangzhou Municipal Public Construction Development Company, 310009 Hangzhou, China)

Abstract: To obtain calculation formula of lateral load distribution for multi-box steel-concrete composite girder bridges, the traditional rigid transverse beam method, modified rigid transverse beam method and rigid connected beam method are modified for the multi-box composite girder bridges by considering the interface slippage's effect. The results obtained by the modified theoretical algorithms are compared with the values gained by finite element method which has been validated by experiments. The results show that the modified rigid connected beam method considering slippage effect is applicable to calculate the lateral load distribution of mid-span cross section in multi-box composite girder bridge. When the bridges meet the narrow bridge conditions, i. e. the bridges with span-width ratio is not less than 2, the modified and simplified rigid transverse beam method considering slippage effect is also suitable to calculate the lateral load distribution of the mid-span in the bridges. Finally, it is suggested that the partial load effect of the bridge could be reduced by using incomplete shear connection form or properly strengthening the transverse connection rigidity among steel box girders when the multi-box composite girder bridges are designed.

Key words: bridge engineering; steel-concrete composite; multi-box girder; lateral load distribution; slippage effect

多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥, 由于其结构自身高度低、质量轻、便利吊装、可进行无支架施工、有利于施工中交通组织等优点, 已逐渐在跨

线桥、城市立交桥中得到应用. 但多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥不像多梁式混凝土小箱梁桥或 T 梁桥, 而是由开(闭)口钢箱梁在其上通过设置剪力件连接件浇筑混凝土板而形成组合结构共同受力. 因此如何合理地设计计算其内力是必须解决的问题.

收稿日期: 2011-08-02.

基金项目: 2011 杭州市建委科研项目(杭建科简复 2011(1)号).

作者简介: 项贻强(1959—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 项贻强, xiangyiq@zju.edu.cn.

传统的分析简支多梁式桥的内力分析方法一般借助荷载横向分布的概念将空间的计算问题转化为平面问题,主要有杠杆法、偏心压力法、修正偏心压力法、刚接梁法、G - M 法等^[1-2]. 文献[3-4]针对曲梁桥和斜交桥弯扭耦合的特点,利用力法原理进一步推导了简支曲梁桥和斜交桥荷载横向分布的计算公式,提出了传递矩阵法和修正的刚接梁法,文献[5]则在上述研究的基础上进一步提出了弹性支承连续梁法计算空间梁拱组合式桥梁的荷载横向分布;聂鑫等^[6]针对变截面箱形钢 - 混凝土连续组合梁桥,进一步采用修正的偏心压力法计算其荷载横向分布系数,并与空间有限元分析结果和实桥试验结果进行对比,结果表明采用上述修正的偏心压力法计算较为简便并偏于安全. 聂建国等^[7]计算了钢 - 混凝土组合梁加宽后的混凝土梁桥横向分布系数,并在刚接梁法基础上,考虑了组合梁与原桥主梁刚度、间距差异,建立了修正刚接梁法来计算此种桥的横向分布系数. 聂建国等^[8]还用两根钢 - 混凝土组合梁加宽混凝土 T 梁构件进行试验,对弹性工况下的挠度、支座反力横向分布规律进行了研究,试验得出在 $L/4$ 与 $L/2$ 处的横向分布系数与刚性横梁法、修正刚接梁法计算结果吻合良好,在支点处的横向分布系数与杠杆法计算结果吻合良好.

上述研究中,对钢 - 混组合梁桥均未考虑组合梁桥的滑移效应对其横向分布系数的影响. 本文在仔细考虑界面滑移的基础上,推导多梁式钢 - 混凝土组合小箱梁桥荷载横向分布系数计算公式,并以一典型组合桥梁为背景进行计算分析,同时与有限元数值模型计算结果进行对比分析,给出此类桥的横向分布系数的合理计算方法.

1 荷载横向分布系数公式推导

在计算多梁式钢 - 混凝土组合小箱梁桥的横向分布系数时,由于钢 - 混接合面处在荷载作用下会产生滑移,因此假定该组合梁在车载作用下的挠度由两部分组成:钢梁与混凝土板完全结合时产生的挠度 f_c 及钢梁与混凝土板交接面滑移而产生的挠度 Δf , 于是,作用在该梁上的荷载可按刚度(或挠度)进行分担,即, ξP 和 $(1 - \xi)P$, 其中 ξ 为刚度分配系数,具体推导见式(3).

1.1 组合小箱梁的刚度

组合结构应用初期,主要使用换算截面法计算其抗弯刚度;20 世纪 50 年代,美国学者 Newmark 等^[12]考虑了钢混接合面的滑移对组合结构刚度的影响,建立了组合结构的挠度 - 滑移模型,

得到较复杂的滑移挠度方程;90 年代,清华大学聂建国等^[8-10]在组合结构方面做了大量研究,本文采用文献[10]提出的折减刚度法计算组合结构单梁滑移效应引起的附加挠度及分担系数(抗弯刚度).

集中荷载作用下附加挠度

$$\Delta f_1 = \frac{\beta P \left(\frac{l}{2} - \frac{1}{\alpha} \right)}{2h}, \tag{1}$$

均布荷载作用下附加挠度

$$\Delta f_2 = \frac{\beta q \left(\frac{l^2}{8} - \frac{1}{\alpha^2} \right)}{h}. \tag{2}$$

式中: $\beta = hp/2kA_1$, $\alpha^2 = kA_1/E_s I_0 p$, $I_0 = I_s + I_c/n_c$, $A_1 = I_0/A_0 + h^2/4$, $1/A_0 = 1/A_s + 1/A_c$, $n_c = E_c/E_s$, k 为连接件的刚度, p 为连接件的间距, h 为梁高, A_s 、 E_s 、 A_c 、 E_c 分别是钢与混凝土板弹性模量和面积, I_s 、 I_c 分别是钢梁与混凝土材料对其截面中性轴的抗弯惯性矩.

由于滑移引起了附加挠度,使得组合结构挠度由两部分(Δf 与 f_c)组成,按挠度进行刚度分配的系数为

$$\xi = f_c / (f_c + \Delta f), \quad 1 - \xi = \Delta f / (f_c + \Delta f). \tag{3}$$

同时,挠度的增加也可等效视作抗弯刚度的折减

$$EI_0 = EI / (2 - \xi). \tag{4}$$

不考虑滑移效应的挠度,对集中荷载 $f_c = PL^3/48EI$,对均布荷载 $f_c = 5qL^4/384EI$, EI 为组合梁不考虑滑移效应的抗弯刚度(其由换算截面法确定, E 为换算材料的弹性模量, I 为换算材料截面的抗弯惯性矩), EI_0 为考虑滑移效应后的组合结构抗弯刚度(I_0 为考虑滑移效应后换算材料截面的抗弯惯性矩).

抗扭刚度按文献[1],将混凝土板的剪切模量换算为钢材 $h_c G_c/G_s$,形成具有闭口截面的等效闭口钢箱梁,其扭转惯性矩为

$$K = G_s \oint \frac{\Omega^2}{t_s} ds + 2G_c a t_c. \tag{5}$$

式中: Ω 为闭口截面所围面积的 2 倍, ds 为绕箱梁四周的微段弧长, a 为翼板宽, G_s 、 G_c 为钢板和混凝土板的剪切模量.

1.2 偏心压力法

在进行多梁式钢 - 混凝土组合小箱梁桥设计时,为增强桥梁结构的稳定性和整体受力性能,一般沿桥纵向每隔一定间距内设一道钢横隔梁,故可假定钢横隔梁为刚性,然后应用偏心压力法来

计算横向分布系数. 其适用条件^[13]为

$$n \sqrt[4]{\beta_0} \leq 1.0, \beta_0 = \frac{\pi^4 n_c I_0 d^3}{3l^4 I_b} \quad (6)$$

式中: n 为主梁数, d 为主梁之间桥面板净跨度的
一半, l 为主梁跨度, I_0 为主梁抗弯惯性矩, I_b 为单
位宽度(沿桥纵向)的桥面板抗弯惯性矩, n_c 为钢
材的弹性模量与混凝土弹性模量之比.

1.2.1 中心荷载 $P = 1$ 的作用

对于具有 n 片的 U 型钢 - 混凝土组合梁桥
(图 1), 由于假定中间横隔梁是刚性的, 各根主梁
第一部分挠度引起的反力为文献[1-2]结果乘
以刚度分配系数 ξ .

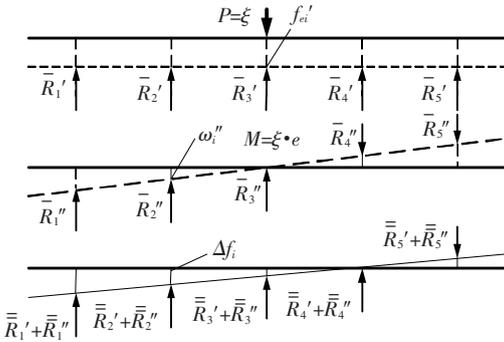


图 1 偏心压力法的荷载分布

$$\bar{R}'_i = \frac{\xi I_{0i}}{\sum_{i=1}^n I_{0i}}$$

对附加挠度:

$$\Delta f_i = \alpha_2 \bar{R}'_i,$$

$$\bar{R}''_i = \alpha_1 I_{0i} \Delta f_i = \alpha_1 \alpha_2 I_{0i} \bar{R}'_i = \alpha_1^2 \alpha_2 I_{0i}^2 f'_{ei}.$$

式中 $\alpha_2 = \frac{\beta \left(\frac{l}{2} - \frac{1}{\alpha} \right)}{2h}$, 符号含义见式(1).

$$\sum_{i=1}^n \bar{R}'_i = \alpha_1 \sum_{i=1}^n I_{0i} \Delta f_i = \alpha_1^2 \alpha_2 f'_{ei} \sum_{i=1}^n I_{0i}^2 = 1 - \xi,$$

$$\alpha_1^2 \alpha_2 f'_{ei} = \frac{1 - \xi}{\sum_{i=1}^n I_{0i}^2}, \quad \bar{R}''_i = \frac{I_{0i}^2 (1 - \xi)}{\sum_{i=1}^n I_{0i}^2}.$$

故

$$R'_i = \bar{R}'_i + \bar{R}''_i = \frac{\xi I_{0i}}{\sum_{i=1}^n I_{0i}} + \frac{(1 - \xi) I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n I_{0i}^2}.$$

1.2.2 偏心力矩 $M = 1 \cdot e$ 的作用

在偏心力矩作用下第一部分挠度引起的反力
也可表示为文献[1-2]结果直接乘以刚度分配
系数 ξ .

$$\bar{R}''_i = \frac{\xi \cdot ea_i I_{0i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}}.$$

对附加挠度:

$$\Delta f'_i = \alpha_2 \bar{R}''_i,$$

$$\bar{R}''_i = \alpha_1 I_{0i} \Delta f'_i = \alpha_1^2 \alpha_2 I_{0i}^2 f''_{ei} = \alpha_1^2 \alpha_2 a_i tg \varphi_0 I_{0i}^2,$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{R}''_i \cdot a_i = \alpha_1^2 \alpha_2 \sum_{i=1}^n I_{0i}^2 a_i f''_{ei} =$$

$$\alpha_1^2 \alpha_2 tg \varphi_0 \sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}^2 = 1 - \xi.$$

$$\bar{R}''_i = \frac{(1 - \xi) \cdot ea_i I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}^2},$$

$$R''_i = \bar{R}''_i + \bar{R}''_i = \frac{\xi \cdot ea_i I_{0i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}} + \frac{(1 - \xi) \cdot ea_i I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}^2}.$$

得出任意 i 号主梁荷载分布的一般公式:

$$R_{ik} = \frac{\xi I_{0i}}{\sum_{i=1}^n I_{0i}} + \frac{(1 - \xi) I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n I_{0i}^2} + \frac{\xi \cdot a_i a_k I_{0i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}} + \frac{(1 - \xi) \cdot a_i a_k I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}^2}.$$

1.3 修正偏心压力法

偏心压力法假定钢横隔梁近似绝对刚性和忽
略主梁抗扭刚度, 而实际上多梁式钢 - 混凝土组
合小箱梁桥在外力矩的作用下, 每根主梁除产生
不同挠度外还有一个转动的角. 由于第二部分挠
度是组合小箱梁交接面滑移而产生的, 不会因此
而产生转角, 因此可忽略第二部分挠度的影响. 根
据文献[1-2]建立的平衡条件为

$$\sum_{i=1}^n \bar{R}''_i \cdot a_i + \sum_{i=1}^n M_{Ti} = \xi \cdot e,$$

按文献[1]可得抗扭修正系数为

$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{l^2}{12E} \frac{\sum K_i}{\sum a_i^2 I_{0i}}}.$$

最后得到考虑主梁抗扭刚度后任意 k 号梁的
横向影响线竖标为

$$R_{ik} = \frac{\xi I_{0i}}{\sum_{i=1}^n I_{0i}} + \frac{(1 - \xi) I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n I_{0i}^2} + \beta \frac{\xi \cdot a_i a_k I_{0i}}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}} + \frac{(1 - \xi) \cdot a_i a_k I_{0i}^2}{\sum_{i=1}^n a_i^2 I_{0i}^2}.$$

1.4 刚接梁法

多梁式钢 - 混凝土组合小箱梁桥是由多片开
(闭)口 U 型钢梁和钢横隔梁形成梁格体系与其
上现浇混凝土板组成, 板间完全刚接, 故在此通过
考察每一单梁的竖向和扭转变形, 建立典型的多
梁式力法方式, 推导刚接梁法计算其荷载横向分

布. 由于U型钢梁与现浇混凝土板交接面处, 在外力作用下会产生滑移, 因此在推导刚接梁法计算多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥荷载横向分布系数时必须考虑交接面处滑移的影响. 根据力法原理, 将具有 n 片的U型钢-混凝土组合梁桥在梁间的混凝土板切开, 见图2, 以竖向剪力、弯矩(纵向剪力、轴力忽略)为赘余力, 建立力法方程:

$$[\delta] \{X\} + \{\Delta\} = 0.$$

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1,n-1} & \delta_{1n} & \cdots & \delta_{1,2(n-1)} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2,n-1} & \delta_{2n} & \cdots & \delta_{2,2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \delta_{n-1,1} & \delta_{n-1,2} & \cdots & \delta_{n-1,n-1} & \delta_{n-1,n} & \cdots & \delta_{n-1,2(n-1)} \\ \delta_{n,1} & \delta_{n,2} & \cdots & \delta_{n,n-1} & \delta_{n,n} & \cdots & \delta_{n,2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \delta_{2(n-1),1} & \delta_{2(n-1),2} & \cdots & \delta_{2(n-1),n-1} & \delta_{2(n-1),n} & \cdots & \delta_{2(n-1),2(n-1)} \end{bmatrix},$$

$$[X] = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \\ \vdots \\ x_{2(n-1)} \end{bmatrix}, \quad [\Delta] = \begin{bmatrix} \Delta_{1p} \\ \Delta_{2p} \\ \vdots \\ \Delta_{n-1p} \\ \Delta_{np} \\ \vdots \\ \Delta_{2(n-1)p} \end{bmatrix}.$$

式中: $[\delta]$ 为柔度系数矩阵, $[X]$ 为赘余竖向剪力和弯矩矩阵, $[\Delta]$ 为荷载引起的位移矩阵.

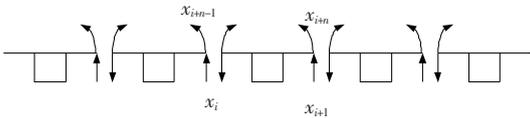


图2 组合小箱梁桥界面内力

方程中的各系数根据组合小箱梁桥力与变形的关系, 如图3所示, 各柔度系数计算如下.

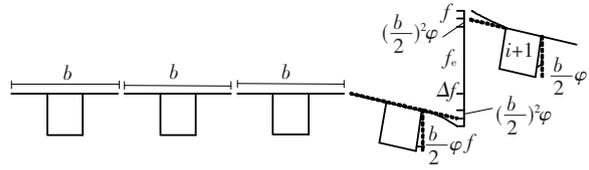
$$\begin{cases} \delta_{ii} = 2\left(f_e + \frac{b}{2} \cdot \frac{b}{2} \varphi + f + \Delta f\right), \\ \delta_{i+n-1, i+n-1} = 2(\varphi' + \varphi). \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n-1)$$

$$\begin{cases} \delta_{i, i+n-1} = \delta_{i+n-1, i} = \varphi \frac{b}{2}, \\ \delta_{i+n-1, i+n} = \delta_{i+n, i+n-1} = -\varphi, \\ \delta_{i, i+1} = \delta_{i+1, i} = -\left(f_e + \Delta f - \frac{b}{2} \cdot \frac{b}{2} \varphi\right), \\ \delta_{i+1, i+n-1} = \delta_{i+n-1, i+1} = -\varphi \frac{b}{2}, \\ \text{其余, } \delta_{ij} = 0. \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n-2)$$

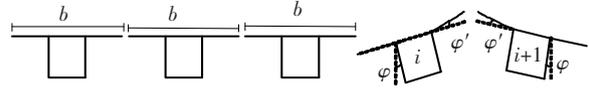
j 为外荷载 P 作用位置, 则有

$$\begin{cases} \Delta_{ipj} = (f_e + \Delta f), (i = j, j = 1, 2, \dots, n-1) \\ \Delta_{ipj} = -(f_e + \Delta f), (i = j-1, j = 2, \dots, n) \\ \text{其余, } \Delta_{(i+n-1)pj} = 0. \end{cases}$$

式中: Δf 与 f_e 的意义同前, f 为单位竖向荷载作用在小箱梁悬臂端部时在该处产生的弹性挠度(忽略不计小箱本身的畸变变形), φ 为单位扭矩作用于小箱梁截面扭心时引起的截面扭转角(不计翘曲扭转), φ' 为在小箱梁悬臂端部作用有单位弯矩时在悬臂端部产生的弹性扭转角(忽略不计小箱本身的畸变变形), f' 为在小箱梁悬臂端部作用有单位弯矩时在悬臂端部产生的弹性挠度或在小箱梁悬臂端部作用有单位竖向荷载时在悬臂端部产生的扭转角.



(a) 缝端单位竖向剪力作用下的挠度与转角图



(b) 缝端单位弯矩作用下的挠度与转角图

图3 组合小箱梁桥计算图式

2 算例

杭州市秋石二期工程(半山隧道北口-余杭界)跨越绕城公路处的简支钢-混多梁式组合小箱梁结构体系(图4), 其结构形式采用40 m 钢混组合小箱梁, 组合小箱梁的钢结构部分采用全焊接钢梁, 钢梁由U型主梁, 横隔梁及加劲肋组成, 钢梁上翼缘板顶面设置剪力键与混凝土桥面板连为整体. 单跨为5片钢混组合小箱梁, 桥宽为23 m, 钢主梁梁高为2.23 m. 钢筋混凝土桥面板为现场浇筑, 设计标号C50, 两侧设牛腿分别架与盖梁或混凝土箱梁上. 表1给出了钢-混组合小箱梁桥的计算参数.

应用 ANSYS 有限元软件建立三维有限元模型, 按两种工况对多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥横向分布进行研究, 第1种工况为第1列车+第2列车, 第2种工况为第1列车+第2列车+第3列车(图5, 图6). 将钢混交接面考虑成 Goodman 弹性夹层, 用三弹簧单元模拟, 剪力钉的双向剪切刚度及抗拉刚度为三弹簧单元的刚度,

用 8 节点 Solid65 实体单元模拟钢筋混凝土板, U 型钢梁、横隔板、加劲肋以及顶部连接钢板采用空间 Shell181 壳体单元, 混凝土的泊松比为 0.167. 钢材的泊松比为 0.3. 对于有限元方法, 第 i 号梁的横向分布系数计算公式, 采用文献[7]中经试

验验证的公式

$$m_i^0 = \frac{nf_i(EI_0)_i}{\sum_{i=1}^n f_i(EI_0)_i}$$

式中: f_i 表示 i 号梁跨中挠度, n 表示加载车列数.

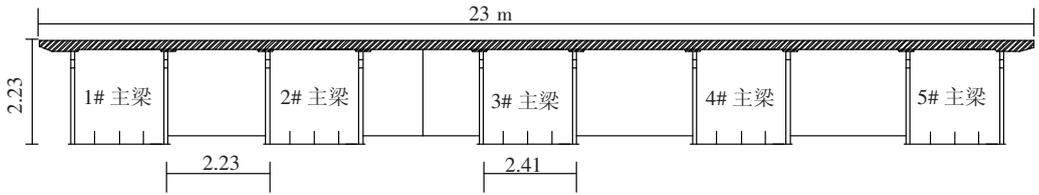


图 4 算例横断面

表 1 多梁式钢-混组合小箱梁桥的计算参数

主梁混凝土弹模/GPa	主梁混凝土板厚/mm	钢梁腹板厚/mm	钢梁底板厚/mm	钢横梁腹板厚/mm	钢梁弹模/GPa
34.5	250	20	20	16	206

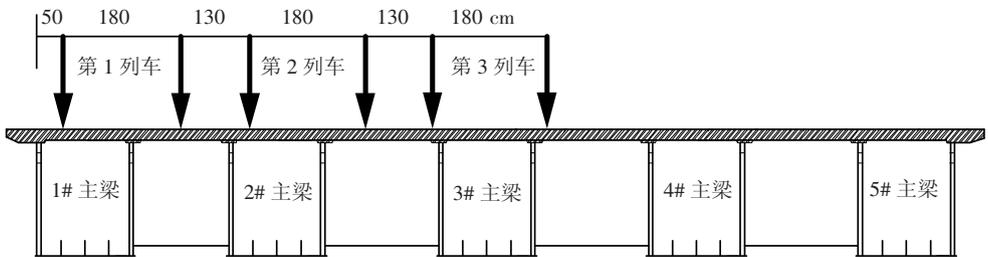


图 5 横桥向加载布置

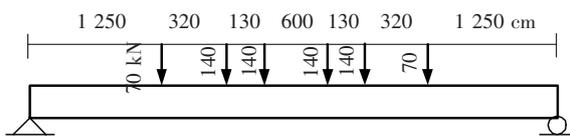


图 6 纵桥向加载布置

表 2 各计算方法计算的跨中横向分布系数的比较

工况	梁号	偏心压力法	修正偏心压力法	刚接梁法 (不考虑滑移)	刚接梁法 (考虑滑移)	有限元法
1	1	1.004	1.000	0.734	0.701	0.701
	2	0.702	0.700	0.577	0.565	0.568
	3	0.400	0.400	0.367	0.358	0.356
	4	0.098	0.100	0.201	0.232	0.230
	5	-0.204	-0.200	0.121	0.151	0.145
2	1	1.320	1.315	0.941	0.927	0.926
	2	0.960	0.957	0.830	0.823	0.825
	3	0.600	0.600	0.602	0.601	0.600
	4	0.240	0.243	0.361	0.389	0.390
	5	-0.120	-0.115	0.247	0.250	0.259

从表 2 可以看出, 考虑滑移效应影响的刚接梁法的计算结果与有限元方法的计算结果非常接近; 不考虑滑移效应影响的刚接梁法, 对 1、2 号梁的计算结果略微偏大(荷载作用区域荷载横向分布系数控制值处最大的差值约在 4%), 3、4、5 号梁略微偏小; 考虑滑移效应影响的偏心压力法和修正偏心压力法, 对 1、2 号梁的计算结果明显偏

表 2 给出了工况 1、2 情况下典型钢-混凝土组合小箱梁桥, 按照本文提出的考虑组合梁滑移效应修正的偏心压力法、修正偏心压力法及刚接梁法等计算的桥跨中截面各梁的荷载横向分布系数结果, 并将有限元法的计算结果一并列入表 2 比较.

大(最大的偏高估计达 40%), 4、5 号梁明显偏小(约 35%~40%). 这是因为: 1) 算例的条件不满足窄桥要求(即不满足式(6), $2.16 > 1$), 不能采用偏心压力法计算; 2) 由于多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥滑移效应的影响, 使得梁的刚度有所减小, 而荷载横向分布实质上是按刚度分配的, 故滑移效应对荷载横向分布有一定的影响; 3) 考虑

滑移刚接梁法在计算过程中考虑了钢箱梁与混凝土板间的滑移效应,具有较高的计算精度.此种方法适用于多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥横向分布系数计算.

为进一步分析多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥混凝土板厚、剪力钉数、钢梁刚度等参数的变化对其横向分布的影响,建立相应的有限元模型,通过数值分析研究其对多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥横向分布的影响,计算结果见表3~5.

表3 混凝土板厚对横向分布系数的影响

工况	梁号	板厚/cm		
		25	40	60
2	1	0.926	0.916	0.902
	2	0.825	0.805	0.794
	3	0.600	0.587	0.581
	4	0.390	0.387	0.398
	5	0.259	0.306	0.326

表4 剪力钉数对横向分布系数的影响

工况	梁号	N/N_f			
		$N/N_f = 3.58$	$N/N_f = 1.0$	$N/N_f = 0.8$	$N/N_f = 0.6$
1	1	0.701	0.696	0.687	0.678
	2	0.568	0.560	0.546	0.535
1	3	0.356	0.355	0.350	0.347
	4	0.230	0.240	0.259	0.270
	5	0.145	0.150	0.158	0.171

注: N_f 为完全连接时剪力钉个数, N 为实际剪力钉个数.

表5 钢梁刚度对横向分布系数的影响

工况	梁号	I/I_s		
		$I/I_s = 1$	$I/I_s = 0.75$	$I/I_s = 0.5$
1	1	0.926	0.933	0.941
	2	0.825	0.834	0.840
2	3	0.600	0.600	0.601
	4	0.390	0.382	0.375
	5	0.259	0.253	0.242

注: I_s 为设计基准钢梁刚度, I 为实际钢梁刚度.

从表3可知,随着混凝土桥面板厚的增加,1、2、3号梁的横向分布系数减少,4、5号梁的横向分布系数增加,表明随着板厚增加,板的刚度增大,分布车辆荷载的效果逐渐加强.从表4可知,随着剪力钉数量的减少,钢箱梁与混凝土板间的连接变弱,多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥的滑移效应对荷载横向分布的影响更趋明显.从表5可知,随着组合箱梁钢梁的刚度减少,多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥横向偏载效应越加明显.

3 结 语

计算多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥跨中截面处的横向分布系数,应采用考虑滑移影响的修正计算公式.当桥宽不满足式(6)时,应采用考虑接合面滑移效应修正的刚接梁法,其计算精度与

有限元法较为接近;当桥宽满足式(6)时,则也可采用更为简洁的考虑滑移修正偏心压力法来计算.

在进行多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥设计时,应考虑板厚、钢梁刚度、剪力钉数量对多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥横向分布系数的影响,为减少多梁式钢-混凝土组合小箱梁桥偏载效应,在满足规范要求的情况下,建议采用刚度较大的混凝土板和钢梁,适当加强横向连接的钢横梁刚度,接合面的连接形式则应采用不完全剪力连接形式.

参 考 文 献:

- [1] 姚玲森. 桥梁工程 [M]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [2] 李国豪. 公路桥梁荷载横向分布计算 [M]. 北京:人民交通出版社, 1990.
- [3] 项贻强, 余建华. 桥梁结构的数值分析方法 [M]. 北京:人民交通出版社, 1993.
- [4] 项贻强, 杨万里, 潘仁泉, 等. 拱索体系加固的刚架拱桥荷载横向分布 [J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 91-95.
- [5] 项贻强, 李新生, 申永刚, 等. 空间梁拱组合式桥梁的分析理论及试验研究 [J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 67-71.
- [6] 聂鑫, 樊健生, 付裕. 箱形截面连续组合梁桥的荷载横向分布 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 49(12): 1930-1933.
- [7] 聂建国, 张晓光, 樊健生, 等. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土梁桥的横向分布系数 [J]. 清华大学学报:自然科学版, 2010, 50(6): 805-809.
- [8] 聂建国, 张晓光, 樊健生. 钢-混凝土组合梁加宽混凝土旧桥试验 [J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 35-48.
- [9] 聂建国, 沈聚敏, 袁彦声. 钢-混凝土筒支组合梁变形计算的一般公式 [J]. 工程力学, 1994, 11(1): 21-27.
- [10] 聂建国, 沈聚敏, 余志武. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁变形计算的折减刚度法 [J]. 土木工程学报, 1995, 28(6): 11-17.
- [11] GOODMAN J R. Layered wood systems with interlayer slip [D]. California: University of California, 1967.
- [12] NEWMARK N M, SIESS C P, VIEST I M. Test and analysis of composite beams with incomplete interaction [J]. Proceedings of Society for Experimental Stress and Analysis, 1951, 9(1): 75-92.
- [13] 同济大学路桥教研组. 公路桥梁荷载横向分布计算 [M]. 北京:人民交通出版社, 1977.

(编辑 赵丽莹)