

曲线 U 型钢与混凝土组合梁界面滑移 及轴向力研究

陈百玲,王盛楠,裴家兴,王连广

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要 目的 研究曲线 U 型钢与混凝土组合梁界面滑移以及轴向力的计算,为工程实践中曲线桥梁的建设提供参考。方法 以弹性理论为基础,建立曲线 U 型钢与混凝土组合梁的界面滑移及轴向力基本方程,给出曲线组合梁在竖向均布荷载作用时的界面滑移及轴向力计算公式,并分析其中 5 种设计参数的影响。结果 随着荷载增加,界面滑移值及轴向力增加;连接刚度增大时,界面滑移值减小而轴向力增大;构件尺寸增大时,滑移值及轴向力均减小;混凝土强度等级影响最不明显;U 型钢梁高度增大时,滑移值及轴向力均减小。结论 在设计中应着重考虑曲线组合梁连接刚度及作用荷载值的影响,可为工程实践中曲线桥梁的建设提供参考。

关键词 曲线组合梁;界面滑移;轴向力;设计参数

中图分类号 TU398

文献标志码 A

Study on Interface Slip and Axial Force of Curved U-Steel and Concrete Composite Beams

CHEN Bailing, WANG Shengnan, PEI Jiaying, WANG Lianguang

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, China, 110819)

Abstract: The calculation of interface slip and axial force of U-shaped steel and concrete composite beam were studied to provide references for the construction of curved bridges in engineering practice. Based on the elastic theory, the differential equation of interface slip of curved composite beams and the differential equation of axial force control under the influence of slip are established, and the theoretical calculation formulas for vertical uniform load is also gave. The influence of five design parameters on interface slip value and axial force is calculated and analyzed. As the load increases, the amount of interface slip and axial force increase; as the stiffness of connector increases, the amount of interface slip decreases and the axial force increases; as the height and width of the concrete slab increase, the slip value and axial force

收稿日期:2020-09-19

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51808100);辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD_0004);辽宁省自然科学基金项目(20170540303)

作者简介:陈百玲(1972—),女,副教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构方面研究。

decrease; the change in radius of curvature has little effect; when the height of U-shaped steel beam increases, the slip value and axial force decrease. The influence of connection stiffness and action load value of curved composite beams should be considered in the design, which can provide a reference for the construction of curved bridges in engineering practice.

Key words: curved composite beams; interface slip; axial force; design parameters

随着城市交通事业的发展,越来越多的曲线组合梁将应用在城市建设中,曲线组合梁不仅造型美观大方而且具有承载能力更高、适应性更强等特点^[1]。在实际应用中,曲线组合梁将钢与混凝土组合桥梁和曲线桥梁组合起来成为一种新型的桥梁结构,适用于当今及未来的建设^[2]。

国内外学者对曲线组合梁的研究初始阶段仅限于线形分析,之后逐渐集中在对曲线组合梁的力学特点及荷载分配等问题的研究^[3-4]。J. M. Segura^[5]提出了曲线组合梁在弯曲荷载下的一种应力解析方法。21世纪后,曲线组合梁的计算理论逐渐完善。I. Ecsedi^[6]给出了曲线组合梁位移、滑移及应力的求解方法,O. Demir^[7]利用广义微分求积法求解了曲线组合梁自由振动的方程。此外,试验研究及数值分析也是常用的研究方法。F. Fernando^[8]对曲线组合梁的屈曲行为进行研究,并提出了一种曲线组合梁的几何非线性有限元模型。D. M. Taylan^[9]对曲线组合梁在不同深度及位置的横向裂缝产生的自由振动进行了试验研究。同国外相比,我国对曲线梁桥的研究起步较晚,各方面研究还比较落后。最开始的时候,曲线梁是以直代曲,其本质仍为直线梁。随着经济发展,才开始出现真正的曲线梁桥,孙鹏^[10],耿凯^[11],杨顺达^[12]等开始对曲线组合梁的各种力学性能进行研究。姚玲森教授^[13]研究了曲线梁的计算模型,并推导求解了曲线梁的内力。李国豪教授^[14]提出曲线梁的约束扭转和畸变与直线梁相比大有不同,应增加修正项。国内学者朱力^[15],郭增伟^[16],李明杰^[17]等通过数值分析及试验对曲线组合梁

畸变、弯扭等力学行为进行了研究。在曲线组合梁中,由于外荷载和曲率的存在,钢梁与混凝土板之间的连接件会产生变形而引起界面之间的滑移^[18]。因此,与直线梁相比,曲线组合梁的受力分析会复杂得多。

目前,对于曲线组合梁的研究还不够完善,国内也没有特别完整的设计规范,许多技术难点亟待解决。基于此,笔者利用弹性理论分析方法,对曲线U型钢与混凝土组合梁的界面滑移及轴向力进行了分析,给出了曲线组合梁在竖向均布荷载作用时的界面滑移及轴向力计算公式,并分析了不同设计参数产生的影响。

1 计算模型及基本假设

曲线钢与混凝土组合梁为双对称轴截面的构件,计算模型见图1。

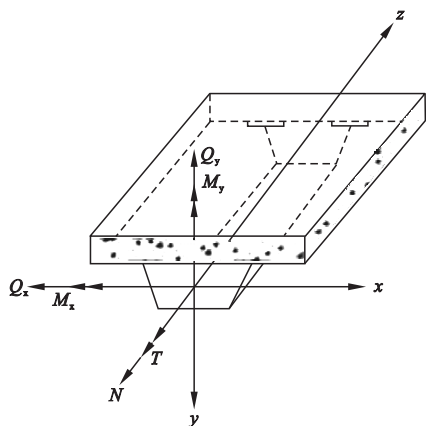


图1 曲线组合梁计算模型

Fig. 1 Calculation model of curved composite beam

取微段梁的轴切线方向(纵向)为 z 方向,曲线向心方向(横向)为 x 方向,垂直于曲线平面并向下为 y 方向。微段的受力平衡如图2所示。

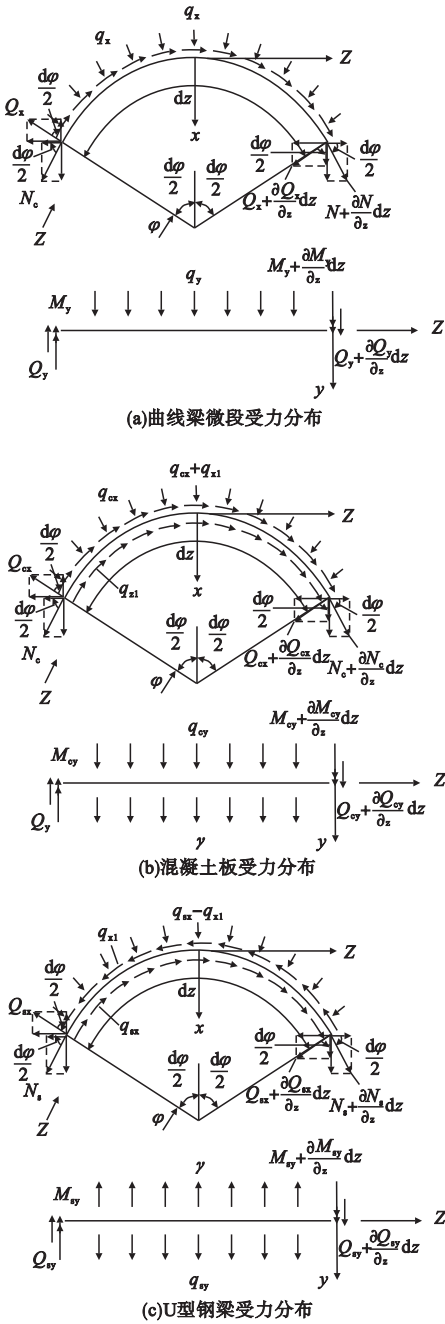


图2 微段的受力平衡

Fig. 2 Force equilibrium diagram of the micro-segment
由曲线组合梁的结构受力特征,做基本假设^[19]:

(1) 所有构件均符合平截面假定;

(2) 各剪力连接件沿其梁长均匀连续分布,且所有连接件剪力都满足 $Q_{z1} = k_s z$, $Q_{x1} = k_s x$ (Q_{z1} 和 Q_{x1} 为滑移引起截面总剪力, z 和 x 为界面滑移值); 单位梁长的剪力 q

满足 $q_{z1} = k_u s_z$, $q_{x1} = k_u s_x$ ($k_u = k/u$, k_u 为单位梁长滑移刚度);

(3) 忽略梁截面的弯扭耦合作用。

2 界面滑移基本方程及计算公式

2.1 界面滑移基本方程

曲线组合梁的内力平衡方程:

$$\frac{\partial M_{cx}}{\partial z} + \frac{T_c}{r} - Q_{cy} + m_{cx} + q_{z1} \frac{h_c}{2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial M_{sx}}{\partial z} + \frac{T_s}{r} - Q_{sy} + m_{sx} + q_{z1} \frac{h_s}{2} = 0. \quad (2)$$

整理上式得:

$$\frac{\partial M_x}{\partial z} + \frac{T}{r} - Q_y + m_x + q_{z1} h = 0. \quad (3)$$

式中: $T = T_c + T_s$; $Q_y = Q_{cy} + Q_{sy}$; $m_x = m_{cx} + m_{sx}$; $h = h_c + h_s$; m_x , m_{cx} , m_{sx} 分别为任意曲线组合梁、混凝土板和钢梁受到的径向均布弯矩; q_{z1} 为轴线滑移引起的力, 即纵向剪应力; h_c , h_s 分别为混凝土板高度及钢梁高度; Q_{cy} , Q_{sy} 分别为混凝土板和钢梁受到纵向的截面剪力; M_{cx} 为混凝土板所受的横向弯矩; M_{sx} 为钢梁所受的横向弯矩; T_c 为混凝土板所受扭矩; T_s 为钢梁所受扭矩。

曲线组合梁弯矩与曲率、扭转角及变形之间关系有:

$$k_x = -\frac{M_{cx}}{E_c I_{cx}} + \frac{\varphi}{r} = -\frac{M_{sx}}{E_s I_{sx}} + \frac{\varphi}{r} = -\frac{M_x}{EI_x} + \frac{\varphi}{r}. \quad (4)$$

式中: $EI_x = E_c I_{cx} + E_s I_{sx}$; k_x 为曲线组合梁的变形; φ 为曲线组合梁的扭转角; r 为曲线组合梁半径; I_{sx} 为钢梁绕 x 轴惯性矩; I_{cx} 为混凝土板绕 x 轴惯性矩; E_s 为混凝土板弹性模量; E_c 为混凝土板弹性模量。

混凝土板底面应变(设以拉为正, 压为负):

$$\varepsilon_c = \frac{h_c k_x}{2} + \frac{N_c}{E_c A_c}. \quad (5)$$

钢梁上翼缘顶面的应变:

$$\varepsilon_s = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{h_s k_x}{2}. \quad (6)$$

再由 $N = -N_c = N_s$ 可得滑移应变为

$$\frac{ds_z}{dz} = \varepsilon_s - \varepsilon_c = \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) N - h k_x. \quad (7)$$

对式(7)求导,并由基本假设整理可得曲线组合梁中的钢梁与混凝土板界面滑移微分方程为

$$\frac{d^2 s_z}{dz^2} - \alpha^2 s_z = \beta T + \gamma Q_y. \quad (8)$$

$$\text{其中, } \alpha^2 = \left(\frac{1}{EA} + \frac{h^2}{EI_x} \right) k_u; \beta = -\frac{h}{r} \times$$

$$\left(\frac{1}{EI_x} + \frac{1}{GI_d} \right); \gamma = \frac{h}{EI_x}.$$

2.2 竖向均布荷载作用时界面滑移计算公式

将竖向均布荷载条件代入界面滑移基本方程(8)中,其中可得扭矩及剪力计算公式:

$$T = r^2 q_y \left(\sin \frac{1}{r} z - \tan \frac{L}{2r} \cos \frac{1}{r} z - \frac{z}{r} + \tan \frac{L}{2r} \right). \quad (9)$$

$$Q_y = q_y \left(r \tan \frac{1}{2r} L - z \right). \quad (10)$$

再利用边界条件:

$$z = \frac{L}{2}, s_z = 0; z = 0, \frac{ds_z}{dz} = 0.$$

计算得到曲线组合梁在竖向均布荷载作用时的界面滑移计算公式:

$$s_z = (A + B) e^{\alpha z} + (C + D) e^{-\alpha z} + E + F. \quad (11)$$

其中, $\delta = -(\beta r + \gamma) q_y; \beta' = \beta r^2 q_y;$

$$A = \frac{r \beta' e^{-\frac{\alpha L}{2}}}{\alpha [(\alpha r)^2 + 1] (e^{-\frac{\alpha L}{2}} + e^{\frac{\alpha L}{2}})};$$

$$B = \frac{\alpha \delta \left(L + 2r \tan \frac{L}{2r} \right) + 2\delta e^{-\frac{\alpha L}{2}}}{2\alpha^3 (e^{-\frac{\alpha L}{2}} + e^{\frac{\alpha L}{2}})};$$

$$C = -\frac{r \beta' e^{\frac{\alpha L}{2}}}{\alpha [(\alpha r)^2 + 1] (e^{-\frac{\alpha L}{2}} + e^{\frac{\alpha L}{2}})};$$

$$D = \frac{\alpha \delta \left(L + 2r \tan \frac{L}{2r} \right) - 2\delta e^{\frac{\alpha L}{2}}}{2\alpha^3 (e^{-\frac{\alpha L}{2}} + e^{\frac{\alpha L}{2}})};$$

$$E = -\frac{r^2 \left(\beta' \sin \frac{z}{r} - \beta' \tan \frac{L}{2r} \cos \frac{z}{r} \right)}{(\alpha r)^2 + 1};$$

$$F = -\frac{\delta}{\alpha^2 z} - \frac{r \tan \frac{L}{2r} \delta}{\alpha^2}.$$

3 轴向力基本方程及计算公式

由于外荷载的存在,钢梁和混凝土板之间的剪力连接件会产生抗剪力,从而使混凝土板和钢梁在不仅产生界面滑移的情况下,还同时受到纵向轴力的作用。通过弹性力学方法,结合基本假设和变形公式,推导出曲线组合梁的轴向力基本方程。

3.1 轴向力基本方程

曲线组合梁的内力平衡方程为

$$\frac{\partial N_c}{\partial z} - \frac{Q_{cx}}{r} + q_{cz} + q_{1z} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial N_s}{\partial z} - \frac{Q_{sx}}{r} + q_{sz} - q_{1z} = 0. \quad (13)$$

分别对上式求导得:

$$\frac{\partial^2 N_c}{\partial z^2} - \frac{\partial Q_{cx}}{r \partial z} + \frac{\partial q_{cz}}{\partial z} + \frac{\partial q_{z1}}{\partial z} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 N_s}{\partial z^2} - \frac{\partial Q_{sx}}{r \partial z} + \frac{\partial q_{sz}}{\partial z} - \frac{\partial q_{z1}}{\partial z} = 0. \quad (15)$$

并根据基本假设 $q_{z1} = k_u s_z$ 得:

$$\frac{dq_{z1}}{dz} = k_u \frac{ds_z}{dz} = k_u \left(\frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{N_c}{E_c A_c} - h k_x \right). \quad (16)$$

将上式代入式(14)中得:

$$\frac{\partial^2 N_c}{\partial z^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial Q_{cx}}{\partial z} - \frac{\partial q_{cz}}{\partial z} - k_u \left(\frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{N_c}{E_c A_c} - h k_x \right). \quad (17)$$

根据变形公式

$$k_x = -\frac{M_x - Nh}{EI_x} + \frac{\varphi}{r}. \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)中,且由内力计算可知:

$$\frac{\partial Q_{cx}}{\partial z} = -\frac{N_c}{r}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial Q_{sx}}{\partial z} = -\frac{N_s}{r}. \quad (20)$$

最后整理可得轴向力基本计算公式为

$$\frac{\partial^2 N}{\partial z^2} - \alpha^2 N = \beta M_x + \gamma \varphi. \quad (21)$$

$$\text{其中, } \alpha^2 = \left(\frac{k_u}{EA} + \frac{k_u h^2}{EI_x} - \frac{1}{r^2} \right); \beta = -\frac{hk_u}{EI_x};$$

$$\gamma = \frac{hk_u}{r}.$$

3.2 竖向均布荷载作用时轴向力计算公式

同样将竖向均布荷载条件代入轴向力基本公式(21)中,其中可得扭矩、扭转角及弯矩计算公式:

$$T = r^2 q_y \left(\sin \frac{z}{r} - \tan \frac{L}{2r} \cos \frac{z}{r} - \frac{z}{r} + \tan \frac{L}{2r} \right). \quad (22)$$

$$\varphi = \frac{r^2 q_y}{GI_d} \cdot \left(-r \cos \frac{z}{r} - r \tan \frac{L}{2r} \sin \frac{z}{r} - \frac{z^2}{2r} + z \tan \frac{L}{2r} + r \right). \quad (23)$$

$$M_x = r^2 q_y \left(\cos \frac{z}{r} + \tan \frac{L}{2r} \sin \frac{z}{r} - 1 \right). \quad (24)$$

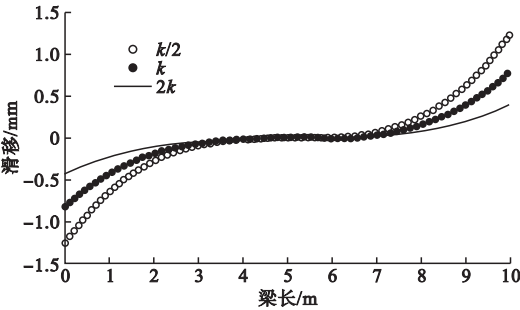
再利用边界条件:

$$z = \frac{L}{2}, \frac{\partial N}{\partial z} = 0; z = 0, \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} = 0.$$

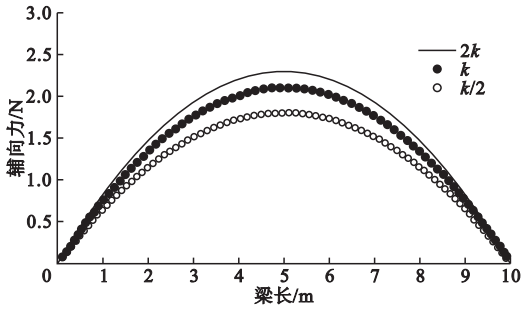
计算得曲线组合梁竖向均布荷载作用时的轴向力计算公式:

$$N = (A+B)e^{\alpha z} + (C+D)e^{(-\alpha z)} + E + F. \quad (25)$$

$$\text{其中, } \beta' = r^2 q_y \left(\beta - \frac{\gamma r}{GI_d} \right); \gamma' = \frac{\gamma r q_y}{GI_d};$$



(a) 界面滑移增量



(b) 轴向力增量

图 3 连接刚度的影响

Fig. 3 Effects of connection stiffness

由图 3 可知,轴向力在梁的跨中截面最大,此时界面滑移值为零;而界面滑移值在梁的两端最大,此时轴向力为零。明显看出,连接刚度的影响较大,当连接刚度值从 $k/2$ 增大到 $2k$ 时,界面滑移值减小而轴向力增大。

$$A = -\frac{\alpha \beta' + \frac{\gamma'}{\alpha} (\alpha^2 r^2 + 1)}{\alpha^3 (\alpha^2 r^2 + 1) (e^{\frac{\alpha L}{2}} + e^{-\frac{\alpha L}{2}})} e^{-\frac{\alpha L}{2}};$$

$$B = \frac{\gamma' \left(L - 2r \tan \frac{L}{2r} \right)}{2\alpha^3 (e^{\frac{\alpha L}{2}} + e^{-\frac{\alpha L}{2}})};$$

$$C = -\frac{\gamma' \left(L - 2r \tan \frac{L}{2r} \right)}{2\alpha^3 (e^{\frac{\alpha L}{2}} + e^{-\frac{\alpha L}{2}})};$$

$$D = -\frac{\alpha \beta' + \frac{\gamma'}{\alpha} (\alpha^2 r^2 + 1)}{\alpha^3 (\alpha^2 r^2 + 1) (e^{\frac{\alpha L}{2}} + e^{-\frac{\alpha L}{2}})} e^{\frac{\alpha L}{2}};$$

$$E = -\frac{\beta' r^2 \left(\tan \frac{L}{2r} \sin \frac{z}{r} + \cos \frac{z}{r} \right)}{\alpha^2 r^2 + 1};$$

$$F = -\frac{\gamma' r \tan \frac{L}{2r}}{\alpha^2} z - \frac{\gamma' r^2}{\alpha^2} + \frac{\beta' r^2 q_y}{\alpha^2} + \frac{\gamma'}{2\alpha^2} z^2.$$

4 算例分析

利用已求得的界面滑移计算式(11)及轴向力计算式(25),可得到界面滑移与轴向力随设计参数的改变而变化的分布曲线。

(1) 连接刚度的影响

根据式(11)和式(25),得到滑移值及轴向力在 3 种连接刚度下沿梁长的分布曲线(见图 3)。

$$\text{Legend: } \text{--- } 2k, \bullet k, \circ k/2$$

(2) 荷载值的影响

根据式(11)和式(25),得到滑移值及轴向力在不同荷载下沿梁长的分布曲线(见图 4)。

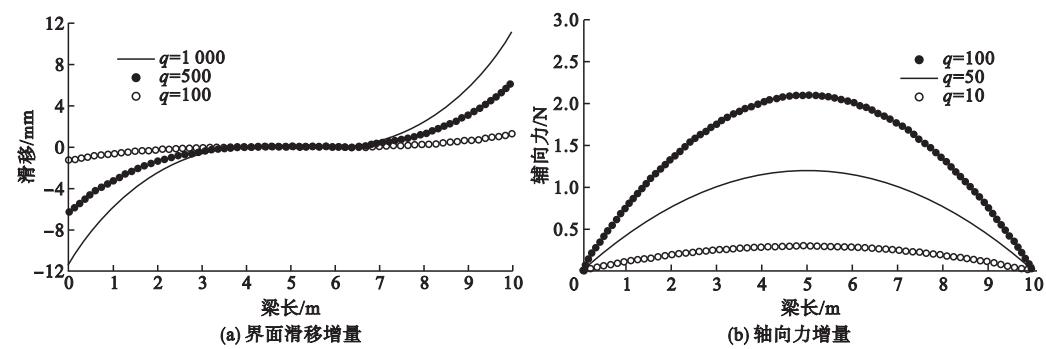


图4 荷载值的影响

Fig.4 Effects of load value

由图4可知,轴向力在梁的跨中截面最大,此时界面滑移值为零。荷载的大小对界面滑移及轴向力影响明显,当荷载增加时,界面滑移值与轴向力均随之增大。

(3) 混凝土强度等级的影响

根据式(11)和式(25),得到曲线组合梁界面滑移及轴向力在不同混凝土等级下沿梁长分布曲线(见图5)。

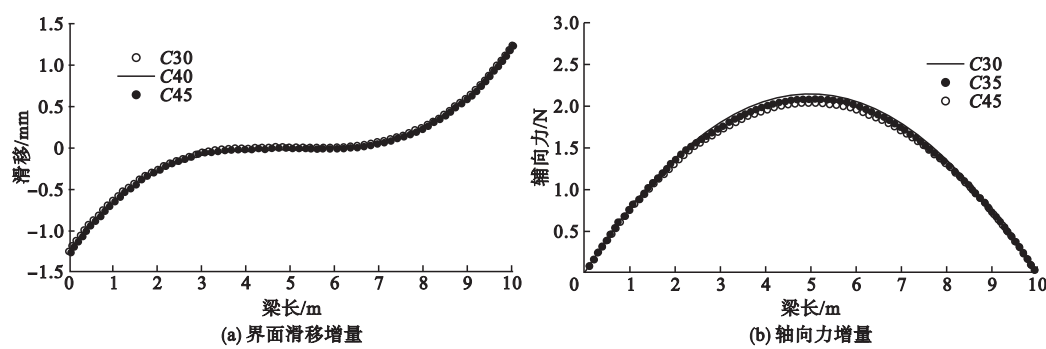


图5 混凝土强度等级的影响

Fig.5 Effects of concrete grade

由图5可知,轴向力在梁的跨中截面最大,此时界面滑移值为零。但曲线组合梁的界面滑移值基本和混凝土强度无关,轴向力变化幅度不明显。

(4) 混凝土板几何尺寸的影响

根据计算公式,得到混凝土板不同宽度及高度的界面滑移及轴向力沿梁长分布曲线,见图6和图7。

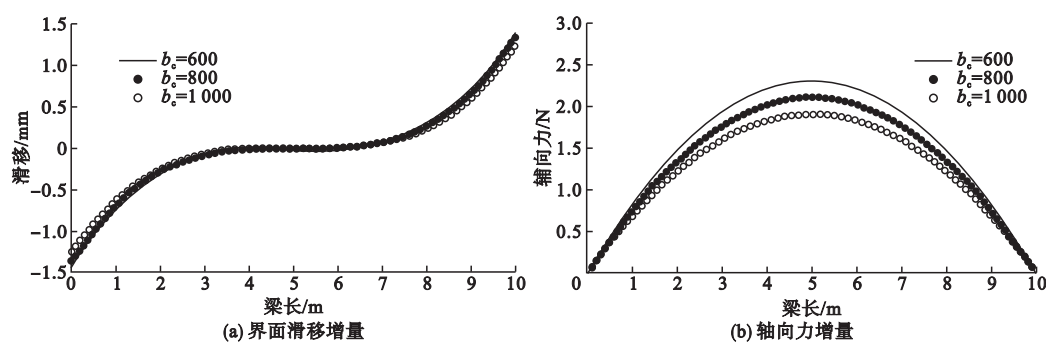


图6 混凝土板宽度的影响

Fig.6 Effects of the concrete slab width

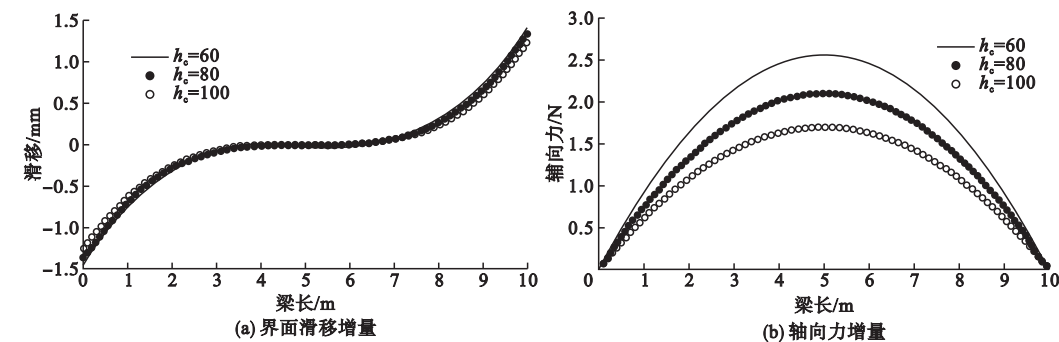


图 7 混凝土板高度的影响

Fig. 7 Effects of the concrete slab height

由图 6 和图 7 可知,滑移值在梁跨中截面为零并且在梁的两端最大。当混凝土板尺寸增加时,滑移值随之减小,但是变化不明显。轴向力在梁跨中时最大,且当混凝土板的尺寸增加时,轴向力随之减小。

(5) U 型钢梁高度的影响

根据计算公式,可以得到界面滑移及轴向力在不同钢梁高度情况下的沿梁长分布曲线(见图 8)。

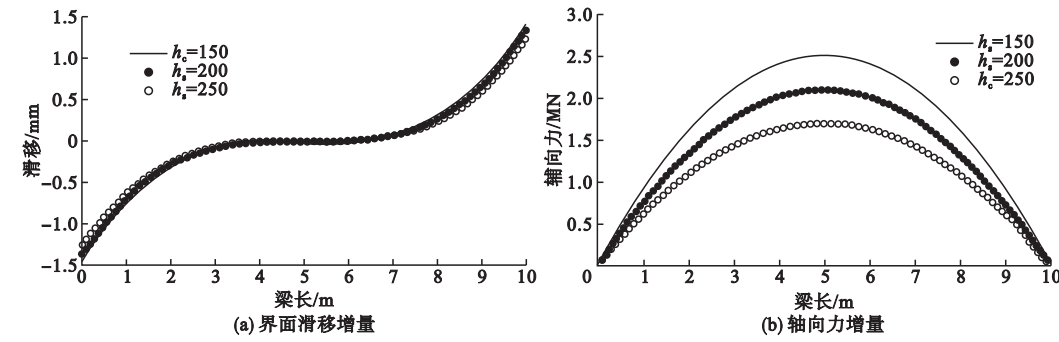


图 8 U 型钢梁的高度影响

Fig. 8 Effects of the U-shaped steel beam height

由图 8 可知,界面滑移值在梁的两端最大,在梁跨中截面为零;轴向力在梁的跨中截面最大,在梁的两端为零。当 U 型钢梁的高度增大时,界面滑移值及轴向力均随之减小。

5 结 论

- (1) 建立的曲线组合梁界面滑移与轴向力基本微分方程,理论上适用于其他荷载情况。
- (2) 荷载和连接刚度对于滑移值的影响最为明显,当荷载增大时,滑移值随之增大;连接件刚度大时,滑移值相对较小;构件尺寸增大的时候,也会相应减小滑移值;混凝土强度等级几乎不会产生影响,滑移值在梁跨中为零,在梁的两端最大。
- (3) 连接刚度和荷载是轴向力的主要影

响因素,当连接刚度变大时,轴向力也变大;当荷载变大时,轴向力也随之增大;混凝土板几何尺寸变大时,轴向力减小幅度不明显;混凝土强度等级几乎不会产生影响。轴向力在梁跨中最大,在梁的两端为零。

(4) 笔者计算结果适用于工程中曲线桥梁的建设,建议在设计中应着重考虑构件的连接刚度以及作用荷载值的影响。

参考文献

[1] 王连广. 预应力钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
(WANG Lianguang. Prestressed composite structures of steel and concrete[M]. Beijing: Science Press, 2009.)
[2] ZHANG Yanling, HOU Zhongming, LI Yunsheng, et al. Torsional behaviour of curved composite beams in construction stage and

- diaphragm effects[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 108: 1 – 10.
- [3] LIU Xinpei, ERKMEN R E, BRADFORD M A. Creep and shrinkage analysis of curved composite beams with partial interaction[J]. International journal of mechanical sciences, 2012, 58(1): 57 – 68.
- [4] HAJIANMALEKI M, QATU M S. Vibrations of straight and curved composite beams: a review[J]. Composite structures, 2013, 100: 218 – 232.
- [5] SEGURA J M, ARMENGAUD G. Analytical formulation of stresses in curved composite beams[J]. Archive of applied mechanics, 1998, 68(3/4): 206 – 213.
- [6] ECSEDI I, LENGUEL Á J. Curved composite beam with interlayer slip loaded by radial load[J]. Curved and layered structures, 2015, 2(1): 50 – 58.
- [7] DEMIR O, BALKAN D, PEKER R C, et al. Vibration analysis of curved composite sandwich beams with viscoelastic core by using differential quadrature method[J]. Journal of sandwich structures and materials, 2020, 22(3): 1099636218767491.
- [8] FRATERNALI F, SPADEA S, ASCIONE L. Buckling behavior of curved composite beams with different elastic response in tension and compression[J]. Composite structures, 2013, 100: 280 – 289.
- [9] TAYLAN D M, AYSE Y. Experimental modal analysis of curved composite beam with transverse open crack[J]. Journal of sound & vibration, 2018, 436: 155 – 164.
- [10] 孙鹏. 超静定曲线组合梁受力性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
(SUN Peng. Study on mechanical behavior of statically indeterminate curved composite beams [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)
- [11] 耿凯. 曲线钢与混凝土连续组合梁受力性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
(GENG Kai. Study of mechanical behavior on curved steel and concrete continuous composite beam[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.)
- [12] 杨顺达. 曲线钢 – 混凝土组合梁桥爬移行为研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
(YANG Shunda. Study on crawling behavior of curved steel mixed composite beam bridge [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.)
- [13] 姚玲森, 王解君. 横向变截面曲线梁桥的计算与分析[J]. 土木工程学报, 1987(3): 44 – 56.
(YAO Lingsen, WANG Jiejun. Analysis of curved multi-girder bridge with various sections[J]. China civil engineering journal, 1987(3): 44 – 56.)
- [14] 李国豪. 桥梁与结构理论研究[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1983.
(LI Guohao. Theoretical research on bridges and structures [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1983.)
- [15] 朱力, 李明杰, 陈超, 等. 曲线钢 – 混凝土组合箱形梁的约束扭转、畸变和界面双向滑移效应[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(增刊1): 299 – 307.
(ZHU Li, LI Mingjie, CHEN Chao, et al. Constrained torsion, distortion and bidirectional interface slip effects of curved steel-concrete composite box beams[J]. Journal of building structures, 2019, 40(S1): 299 – 307.)
- [16] 郭增伟, 陈汉林, 李龙景, 等. 钢混组合曲线梁桥混凝土桥面板应力空间分布特性[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(4): 586 – 593.
(GUO Zengwei, CHEN Hanlin, LI Longjing, et al. Stress distribution characteristics of concrete slabs of steel-concrete composite girder bridges[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(4): 586 – 593.)
- [17] 李明杰. 考虑多种力学、时变效应的曲线组合箱型梁单元的建立[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
(LI Mingjie. Establishment of curved composite box girder elements considering multi-mechanical and time-dependent effects[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.)
- [18] UDDIN A, SHEIKH A H, BROWN D, et al. A higher order model for inelastic response of composite beams with interfacial slip using a dissipation based arc-length method [J]. Engineering structures, 2017, 139(15): 120 – 134.
- [19] 田飞. 钢 – 预制混凝土板组合连续梁桥的结构性能与试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
(TIAN Fei. Structural performance and experimental research of steel girder-full depth deck panel composite continuous bridges[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)