

# 徐变效应下曲线组合梁界面滑移与轴向力 解析法计算

王连广,崔景峰,裴家兴

(东北大学资源与土木工程学院,辽宁 沈阳 110819)

**摘要** 目的 研究徐变效应对曲线组合梁长期力学性能的影响。方法 基于弹性理论和龄期调整有效模量法(AEMM),建立徐变效应下曲线组合梁界面滑移与轴向力控制微分方程。以简支曲线组合梁为研究对象,求得均布荷载作用下微分方程解析公式,着重考察不同时刻和不同平面弯曲转角作用下界面滑移与轴向力沿梁长分布情况,并分析不同荷载和滑移刚度影响下界面滑移与轴向力增量随龄期变化趋势。结果 界面滑移与轴向力沿梁长变化曲线分别关于跨中呈反对称和对称分布,最值发生在跨中与梁端位置;抗剪连接件滑移刚度越大,界面滑移与轴向力随龄期变化增量就越小,与荷载作用趋势相反。结论 曲线组合梁界面滑移与轴向力变化曲线受作用荷载及滑移刚度影响较大,在设计中应着重考虑。

**关键词** 曲线组合梁;徐变效应;均布荷载;界面滑移与轴向力;滑移刚度

中图分类号 TU398

文献标志码 A

## Analysis Method of Creep on Interface Slip and Axial Force of Curved Steel-concrete Composite Beams

WANG Lianguang, CUI Jingfeng, PEI Jiaxing

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

**Abstract:** In order to investigate the effects of creep of long-term mechanical properties on curved composite beam, two governing differential equations of interface slip and axial force considering creep were presented separately based on elasticity theory and the Age-adjusted Effective Modulus Method. Taking simply-supported curved composite beam as a research object, the analytic formulas subjected to uniform loading were proposed and mathematic models were validated. Numerical examples were discussed to emphasize the distributions along the beam length of interface slip and axial force at different ages and plane bending angles on curved composite beam

收稿日期:2020-11-27

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:王连广(1964—),男,教授,博士研究生导师,主要从事钢-混凝土组合结构及现代预应力技术等研究。

under long-term loading, and tendencies of interface slip and axial force's increment with ages under different loads and slip stiffness were analyzed. The analytical results indicate that there are anti-symmetrical and symmetrical distributions of the curves of interface slip and axial force about the mid-span, and the extrema occurs at the mid-span and ends of curved beam. Opposite to loads, the increments of interface slip and axial force with loading time of curved composite beam decreases as the slip stiffness increases. The load and slip stiffness should be considered in design, which greatly influence the curves of interface slip and axial force of curved composite beams.

**Key words:** curved composite beam; creep effect; uniform loading; interface slip and axial force; slip stiffness

钢-混凝土组合梁(简称组合梁)是钢梁与混凝土板通过抗剪连接件协同作用的组合结构形式,能够充分发挥各构件性能的优势<sup>[1]</sup>。目前栓钉-柔性抗剪连接件在组合梁中的应用较为广泛,但在竖向荷载作用下,不可避免地会出现界面滑移,降低组合梁刚度和承载力<sup>[2]</sup>。同时,由于混凝土徐变效应,组合梁会产生内力和应力重分布,进一步增加界面滑移。对组合梁界面滑移与轴向力的研究,在考虑短期荷载效应的同时,还需考虑混凝土板的徐变效应,否则将给组合梁长期使用带来无法估测的损害。此外,与直线组合梁相比,曲线组合梁因其几何构型还需考虑弯扭同时作用,结构性能分析更为复杂。

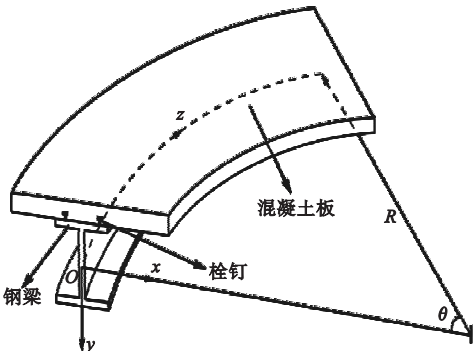
国内外学者对于徐变效应下组合梁的研究主要从理论计算、数值模拟和试验分析三个方向进行<sup>[3-10]</sup>。朱力等<sup>[11]</sup>对组合梁变形、滑移等性能开展了一系列试验探究,提出了更高精度钢-混凝土组合箱梁考虑滑移效应的理论模型;X. Liu 等<sup>[12-13]</sup>对平面弯曲组合梁挠度、滑移及扭转等开展了研究,利用大型有限元软件 ABAQUS 及室内试验验证了所提数值方法的精确性和效率,并证实了徐变作用会显著影响曲线组合梁的长期性能;A. Souici 等<sup>[14]</sup>在考虑徐变效应的基础上给出了组合梁广义内力的时间表达式,能够预测组合梁在任意时刻的应力和应变状态,但未考虑界面滑移的影响;项贻强等<sup>[2]</sup>构建了体外预应力钢-混组合梁长期滑移微分方程并给出通解,其研究结论仅限于直线组合梁。

目前,国内外研究主要集中在直线组合梁短期性能上,忽略了混凝土徐变效应,对曲线组合梁长期性能的研究更是有限。因此,笔者基于弹性理论和龄期调整有效模量法(AEMM),构建了徐变效应下曲线组合梁界面滑移与轴向力微分方程并给出其通解,结合算例分析了徐变效应对曲线组合梁长期性能的影响。研究表明,曲线组合梁界面滑移与轴向力变化曲线受作用荷载及滑移刚度影响较大,在设计中应着重考虑。

1 计算模型

1.1 研究对象

考察如图 1 所示的曲线组合梁,上部为混凝土板,下部为工字型钢梁,对应高度为  $h_c$  和  $h_s$ ,总高度  $h = h_c + h_s$ ,两者之间采用柔性连接件-栓钉连接。将曲线组合梁轴切线方向设为  $z$  轴,沿半径方向设为  $x$  轴,垂直于  $xoz$  平面向下设为  $y$  轴, $y$  轴与  $x$  轴、 $z$  轴形成正交坐标系且遵循右手螺旋定则, $R$  为平面曲率半径。



(a)曲线组合梁坐标系

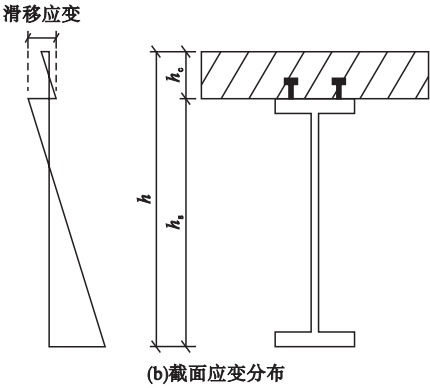


图 1 曲线组合梁坐标系及界面应变分布

Fig. 1 Coordinate system and strain distribution of the curved composite beam

根据建立的曲线组合梁模型,取微段  $dz$ ,对应角度  $d\theta$ ,力矩平衡和界面滑移如图 2 所示。 $A_c$ 、 $I_c$  和  $A_s$ 、 $I_s$  分别为混凝土板和钢梁的截面面积、形心处截面惯性矩。

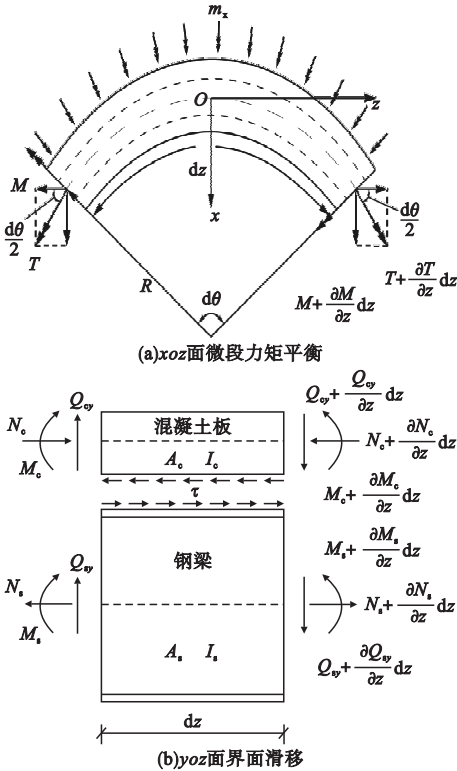


图 2 微段力矩平衡和界面滑移

Fig. 2 Torque equilibrium diagram of micro-segment and slip diagram

F. Gara 等<sup>[15]</sup> 研究分析表明,荷载作用下,钢梁进行弹性工作,混凝土板最大压应变位于应力-应变曲线的上升段。为简化分析

模型,将曲线组合梁近似按弹性体考虑,依据文献[16-17],作如下基本假定:

- (1) 交界面处无竖向掀起,即钢梁与混凝土板曲率保持一致;
- (2) 混凝土板与钢梁各自符合平截面假定;
- (3) 抗剪连接件沿梁长等距分布,  $t$  时刻单位梁长切线方向剪切应力  $\tau(t)$  与界面滑移  $S(t)$  呈线性关系,即:

$$\tau(t) = kS(t). \quad (1)$$

式中:  $k$  为单位梁长滑移刚度,  $k = K/m$ , 其中,  $K$  为连接件剪切刚度,  $m$  为连接件  $z$  向间距。

外荷载作用下曲线组合梁各构件除产生绕各自形心轴的弯矩  $M_c(t)$  和  $M_s(t)$  以及轴力  $N_c(t)$  和  $N_s(t)$  外,同时还会产生集中扭矩  $T$ 。由图 2 及基本假定可得:

$$\frac{dN_c(t)}{dz} = -\tau(t), \quad (2)$$

$$\frac{dN_s(t)}{dz} = \tau(t), \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{T}{GI_d}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial M(t)}{\partial z} + \frac{T}{R} - Q_y + m_x = 0. \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为曲线组合梁扭转角;  $G$ 、 $I_d$  分别为曲线组合梁剪切模量和绕  $z$  轴的抗扭惯性矩;  $M(t)$ 、 $Q_y$  和  $m_x$  分别为曲线组合梁总弯矩、竖向剪力和绕  $x$  轴的分布扭矩。

### 1.2 曲线组合梁各构件应变

取任意时刻  $t$  与任意  $z$  处典型截面,钢梁顶部应变  $\varepsilon_s(t)$  和混凝土板底部应变  $\varepsilon_c(t, t_0)$  分别表示为

$$\varepsilon_s(t) = \sigma_s(t)/E_s. \quad (6)$$

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon^e(t_0) + \varepsilon^{cr}(t, t_0). \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon^e(t_0)$  为弹性应变;  $\varepsilon^{cr}(t, t_0)$  为徐变应变; 其中,  $\varepsilon^e(t_0) = \sigma_c(t_0)/E_c$ ;  $\sigma_s(t)$  为  $t$  时刻钢梁应力;  $\sigma_c(t_0)$  为初始时刻混凝土板应力;  $E_s$ 、 $E_c$  分别为钢梁和混凝土的弹性模量。

### 1.3 徐变应变计算

徐变应变的确定是求解界面滑移问题的关键。笔者采用龄期调整有效模量法(AEMM)近似考虑徐变效应,建立混凝土徐变本构方程,该方程所表示的徐变本构关系目前在国际上应用最为广泛<sup>[18-21]</sup>:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c} [1 + \varphi(t, t_0)] + \frac{\sigma_c(t) - \sigma_c(t_0)}{E_\varphi(t, t_0)}. \quad (8)$$

式中:  $E_\varphi(t, t_0)$  为按龄期调整的有效弹性模量,  $E_\varphi(t, t_0) = E_c / [1 + \rho(t, t_0)\varphi(t, t_0)]$ ; 其中,  $\rho(t, t_0)$  为时效系数,  $\rho(t, t_0) = \frac{1}{1 - e^{-\varphi(t, t_0)}} - \frac{1}{\varphi(t, t_0)}$ ;  $\varphi(t, t_0)$  为徐变系数,按文献[16]规定公式进行确定。

## 2 界面滑移和轴向力解析解

### 2.1 微分方程

根据基本假定(1),弯曲变形过程中钢梁顶部与混凝土板底部界面交接处无竖向掀起,二者具有绕  $x$  轴相同曲率  $\kappa(t)$ , 曲率  $\kappa(t)$  表示为

$$\kappa(t) = -\frac{M_c(t)}{E_c I_{cx}} + \frac{\varphi}{R} = -\frac{M_s(t)}{E_s I_{sx}} + \frac{\varphi}{R} = -\frac{M(t)}{EI_x} + \frac{\varphi}{R}. \quad (9)$$

式中:  $I_x$  为曲线组合梁绕  $x$  轴抗弯惯性矩;  $EI_x = E_c I_{cx} + E_s I_{sx}$ , 其中  $I_{cx}$ 、 $I_{sx}$  分别为混凝土板和钢梁绕  $x$  轴的抗弯惯性矩。

式(6)、式(7)可化为

$$\varepsilon_s(t) = -\frac{h_s}{2}\kappa(t) + \frac{N_s(t)}{E_s A_s}. \quad (10)$$

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{h_c}{2}\kappa(t) + \frac{N_c(t)}{E_c A_c} + \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c} \times \varphi(t, t_0) + \frac{\sigma_c(t) - \sigma_c(t_0)}{E_\varphi(t, t_0)}. \quad (11)$$

则滑移应变  $\varepsilon_{slip}(t)$  可表示为

$$\varepsilon_{slip}(t) = \frac{\partial S(t)}{\partial z} = \varepsilon_s(t) - \varepsilon^e(t_0) -$$

$$\varepsilon^{cr}(t, t_0). \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 S(t)}{\partial z} = \frac{\partial [\varepsilon_s(t) - \varepsilon^e(t_0) - \varepsilon^{cr}(t, t_0)]}{\partial z}. \quad (13)$$

对式(9)求一阶导数,代入式(4)、式(5)可得:

$$\frac{\partial \kappa(t)}{\partial z} = \frac{1}{EI_x} \left( \frac{T}{R} - Q_y + m_x \right) + \frac{1}{R} \frac{T}{GI_d}. \quad (14)$$

联立式(1)~式(3)和式(10)~式(14),化简得徐变效应下曲线组合梁界面滑移微分方程为

$$\frac{\partial^2 S(t)}{\partial z} - \alpha^2 S(t) = \beta T + \gamma Q_y + \zeta \frac{\partial N(t_0)}{\partial z}. \quad (15)$$

其中,

$$\alpha^2 = \left( \frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_\varphi(t, t_0) A_c} \right) \frac{K}{m};$$

$$\beta = -\frac{h}{2R} \left( \frac{1}{EI_x} + \frac{1}{GI_d} \right);$$

$$\gamma = \frac{h}{2EI_x};$$

$$\zeta = \frac{1}{E_\varphi(t, t_0) A_c} - \frac{\varphi(t, t_0)}{E_c A_c}.$$

根据基本假定(3),单个连接件剪力与滑移呈线性关系,对式(1)求一阶导得:

$$\frac{\partial \tau(t)}{\partial z} = k \frac{\partial S(t)}{\partial z}. \quad (16)$$

将式(12)代入式(16)得:

$$\frac{\partial \tau(t)}{\partial z} = [\varepsilon_s(t) - \varepsilon^e(t_0) - \varepsilon^{cr}(t, t_0)] \frac{K}{m}. \quad (17)$$

基于姚玲森<sup>[22]</sup>推得考虑徐变作用后曲线组合梁中混凝土板受力平衡关系如下所示:

$$\frac{\partial N_c(t)}{\partial z} - \frac{Q_{cx}}{R} + \tau_{cz}(t) + \tau(t) = 0. \quad (18)$$

$$\frac{\partial Q_{cx}}{\partial z} = -\frac{N_c(t)}{R}. \quad (19)$$

式中:  $Q_{cx}$ 、 $\tau_{cz}(t)$ 、 $\tau(t)$  分别为任意时刻混凝土板径向剪力、轴向均布力和纵向剪应力。

对式(18)求一阶导得:

$$\frac{\partial^2 N_c(t)}{\partial z^2} = \frac{1}{R} \frac{\partial Q_{cx}}{\partial z} - \frac{\partial \tau_{cz}(t)}{\partial z} - \frac{\partial \tau(t)}{\partial z}. \quad (20)$$

令  $N(t) = N_c(t) = -N_s(t)$ , 联立式(10)、式(11)以及式(17)~式(20), 略去  $\partial \tau_{cz}(t)/\partial z$ , 化简得徐变效应下曲线组合梁截面轴向力微分方程为

$$\frac{\partial^2 N(t)}{\partial z^2} - \lambda^2 N(t) = \mu N(t_0) + \eta M(t) + \xi \varphi. \quad (21)$$

其中,  $\lambda^2 = \alpha^2 - 1/R^2$ ;  $\mu = -K\xi/m$ ;  $\eta = -K\gamma/m$ ;  $\xi = -Kh/2Rm$ 。

## 2.2 微分方程解析解

式(15)、式(21)表示的控制微分方程, 不同荷载工况下具有不同解。笔者以作用均布荷载  $q$  的简支工字型曲线组合梁为例, 利用边界条件, 导出界面滑移与轴向力解析公式, 荷载工况如图3所示。

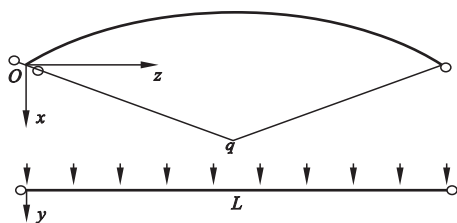


图3 均布荷载作用

Fig. 3 Uniform load on simply supported curved beam

利用边界条件:

$$\begin{cases} z = \frac{L}{2}, S(t) = 0, \frac{\partial N(t)}{\partial z} = 0; \\ z = 0, \frac{dS(t)}{dz} = 0, \frac{\partial^2 N(t)}{\partial z^2} = 0. \end{cases} \quad (22)$$

$$S(t) = \left[ \left( \frac{R\beta'}{\alpha B_s C_s} + \frac{\delta}{\alpha^3 C_s} \right) e^{-\omega_s} + \frac{\delta D_s}{2\alpha^2 C_s} \right] e^{\alpha z} + \left[ \frac{\delta D_s}{2\alpha^2 C_s} - \left( \frac{R\beta'}{\alpha B_s C_s} + \frac{\delta}{\alpha^3 C_s} \right) e^{\omega_s} \right] e^{-\alpha z} - \frac{R^2 \beta'}{B_s} \left( \sin \frac{z}{R} - \tan \frac{L}{2R} \cos \frac{z}{R} \right) - \frac{\delta}{\alpha^2} \left( z + R \tan \frac{L}{2R} \right). \quad (29)$$

其中,  $\omega_s = \frac{\alpha L}{2}$ ;  $B_s = (\alpha R)^2 + 1$ ;  $C_s = e^{-\omega_s} + e^{\omega_s}$ ;  $D_s = L + 2R \tan \frac{L}{2R}$ 。

(2) 轴向力  $N(t)$

$$N(t) = \left[ \frac{(D_N - 2)\xi'}{2} - \frac{\eta'(\lambda^2 + \lambda^3 R E_N)}{B_N} \right] \frac{e^{-\lambda z} - e^{\lambda z}}{\lambda^3 C_N} - \frac{\lambda^2 \eta' + \xi' B_N}{\lambda^4 B_N} e^{-\lambda z} - \frac{\eta' R}{B_N} \left( \tan \frac{L}{2R} \sin \frac{z}{R} + \cos \frac{z}{R} \right) + \frac{\xi'}{\lambda^2} \left( \frac{z^2}{2} - R z \tan \frac{L}{2R} - \frac{B_N - 2}{\lambda^2} \right). \quad (30)$$

求得弯矩  $M(t)$ 、集中扭矩  $T$ 、扭转角  $\varphi$  和剪力  $Q_y$  表达式如下:

$$M(t) = R^2 q \sin \frac{z}{R} \left( \tan \frac{L}{2R} - \tan \frac{z}{2R} \right). \quad (23)$$

$$T = R^2 q \sin \frac{z}{R} \left[ 1 + \tan \frac{L}{2R} \tan \frac{z}{2R} - \frac{z}{R \sin(z/R)} \right]. \quad (24)$$

$$\varphi = \frac{R^2 q}{G I_d} \left( R - R \cos \frac{z}{R} - R \tan \frac{L}{2R} \sin \frac{z}{R} - \frac{z^2}{2R} + z \tan \frac{L}{2R} \right). \quad (25)$$

$$Q_y = R q \left( \tan \frac{L}{2R} - \frac{z}{R} \right). \quad (26)$$

将以上参数分别代入式(15)、式(21), 可得如下方程。

(1) 界面滑移控制微分方程

$$S''(t) - \alpha^2 S(t) = \beta' \sin \frac{z}{R} - \beta' \tan \frac{L}{2R} \cos \frac{z}{R} + \delta z + \delta R \tan \frac{L}{2R}. \quad (27)$$

式中:  $\beta' = \beta R^2 q$ ;  $\delta = -(\beta R + \gamma) q$ 。

(2) 轴向力控制微分方程

$$\frac{\partial^2 N(t)}{\partial z^2} - \lambda^2 N(t) = \eta' \cos \frac{z}{R} + \eta' \tan \frac{L}{2R} \sin \frac{z}{R} - \frac{z^2}{2} \xi' + \xi' R z \tan \frac{L}{2R} + \xi' R^2. \quad (28)$$

式中:  $\eta' = R^2 q [\eta - \xi R / (G I_d)]$ ;  $\xi' = \xi R q / (G I_d)$ 。

由于求解过程相对复杂, 文中仅给出界面滑移和轴向力微分方程最终通解。

(1) 界面滑移  $S(t)$

其中,  $\omega_N = \frac{\lambda L}{2}$ ;  $B_N = (\lambda R)^2 + 1$ ;  $C_N = e^{-\omega_N} + e^{\omega_N}$ ;  $D_N = L - 2R \tan \frac{L}{2R}$ ;  $E_N = -\sin \frac{L}{2R} + \tan \frac{L}{2R} \cos \frac{L}{2R}$ .

3 设计参数分析

依据上述理论模型,取图4简支工字型曲线组合梁为例进行研究,为验证文中方法的有效性,曲线组合梁截面相关参数取自文献[10]。曲线组合梁平面弯曲转角 $\theta$ 为 $15^\circ$ ,跨度 $L=5.9\text{ m}$ ,钢材与混凝土弹性模量 $E_s$ 、 $E_c$ 分别为 $2.0 \times 10^5\text{ MPa}$ 和 $2.51 \times 10^4\text{ MPa}$ ,剪切模量 $G_s$ 、 $G_c$ 对应取 $7.7 \times 10^4\text{ MPa}$ 、 $1.0 \times 10^4\text{ MPa}$ ,剪切刚度 $K$ 取 $84\text{ kN/mm}$ ,间距 $m=600\text{ mm}$ ,环境相对湿度为50%,作用荷载如图5所示。

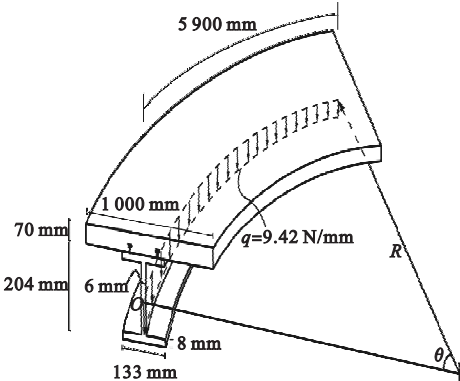


图4 曲线组合梁几何尺寸

Fig. 4 Geometrical dimensions of curved composite beam

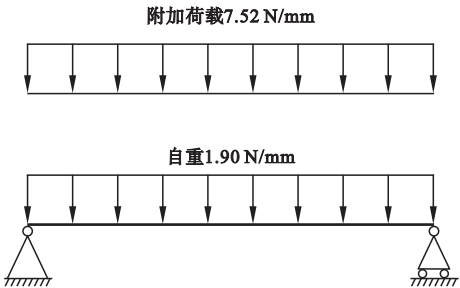


图5 自重和附加荷载

Fig. 5 Self-weight and superimposed load

徐变效应对曲线组合梁结构的长期性能有着重要影响,在进行组合梁界面滑移与轴向力分析之前,对笔者采取的徐变模型进行

验证,计算结果如图6所示。可以看出文中计算方法与文献[10]和文献[11]的数据拟合较好,可作为分析依据。

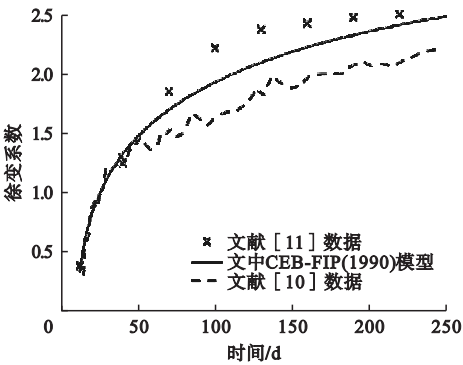


图6 徐变系数

Fig. 6 Creep coefficients

3.1 界面滑移与轴内力

曲线组合梁在不同时刻( $t=10\text{ d}$ ,  $t=1\text{ 000 d}$ )和不同平面弯曲转角( $\theta=5^\circ$ ,  $\theta=15^\circ$ ,  $\theta=30^\circ$ )的纵向界面滑移曲线分别见图7和图8。

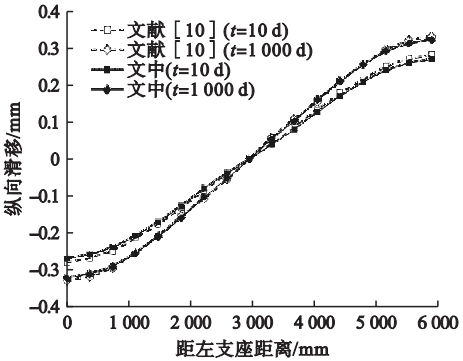


图7 不同时刻沿跨度纵向界面滑移

Fig. 7 Longitudinal interface slip at different ages along the span

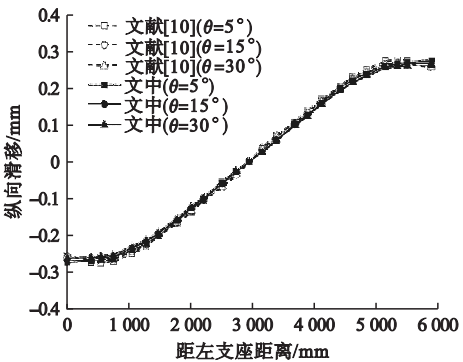


图8 不同平面弯曲转角沿跨度纵向界面滑移

Fig. 8 Longitudinal interface slip of different plane bending angles along the span



由图可知,文中模型与文献[10]中结论吻合较好,验证了文中公式的合理性。图 7 和图 8 均表明滑移刚度  $k$  取 140 MPa 时,沿梁长方向的界面滑移量从梁两端部向跨中位置逐渐减小,两端最大,跨中滑移量为零且关于跨中呈反对称分布;相同跨距下靠近跨中位置处滑移变化量最大,向两端发展变化量越小。从图 7 可以看出,组合梁在荷载长期作用下,时间增大,滑移量随之增大;由图 8 可得,滑移量对不同平面弯曲转角变化的敏感度不大。

考虑徐变效应不同时刻沿梁长的纵向界面滑移见图 9。由图可知,滑移量随龄期增长而增大,且前期增长率较快,而后逐渐减小。此外,滑移量在前 178 d 达到总滑移量的约 80%,528 d 左右基本趋于稳定。

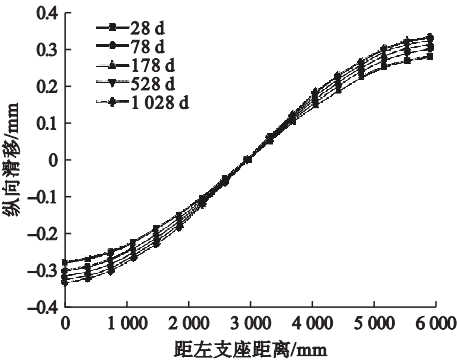


图 9 不同龄期沿跨度纵向界面滑移

Fig. 9 Longitudinal interface slip at different ages along the span

根据文中给出的轴向力理论模型,取初始时间 28 d,最终时间 1 028 d。不同时刻轴向力沿梁长的变化曲线见图 10。

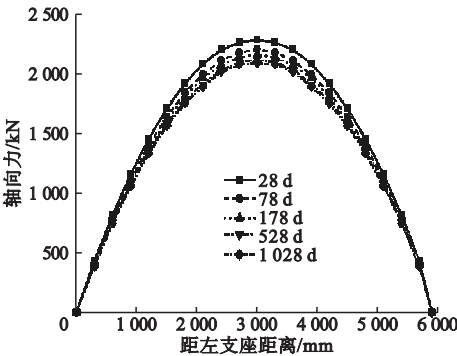


图 10 不同龄期沿跨度轴向力

Fig. 10 Axial force at different ages along the span

图 10 中显示轴向力在梁端部值为零,跨中位置取得最大值且关于跨中呈对称分布,与滑移量最值发生位置恰好相反。同时表明,曲线组合梁的轴向力变化曲线前期变化率较大,528 d 时轴向力值基本趋于稳定。

3.2 荷载和刚度变化影响

不同荷载作用下滑移增量与轴向力增量随龄期变化曲线分别见图 11 和图 12。

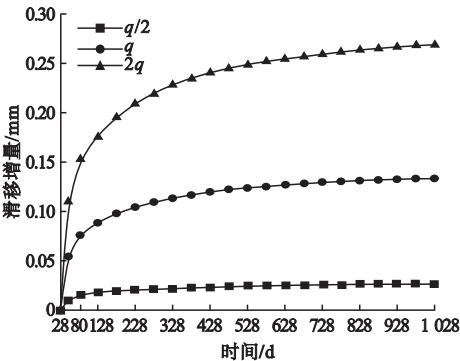


图 11 不同荷载滑移增量 - 龄期变化曲线

Fig. 11 Slip increment-age curves under different loads

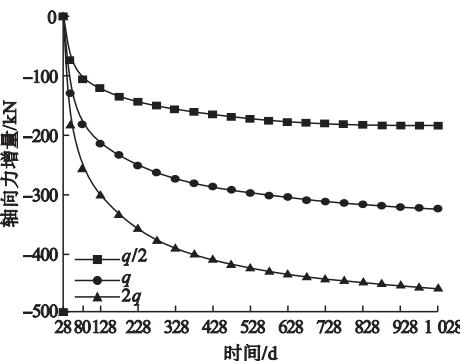


图 12 不同荷载轴向力增量 - 龄期变化曲线

Fig. 12 Axial force increment-age curves under different loads

图 11 表示在 28 d 时,滑移增量为零,滑移量随龄期增加逐渐增大,且增长趋势为非线性。其中,大约在 80 d 前,滑移增量增加速率较大,与加载龄期几乎成正比;大约 80 d 之后滑移增量增长速率较为平缓,并且随着龄期的发展,后期滑移增量基本维持稳定。此外,伴随荷载的增加,界面滑移增量增大,且荷载越大,滑移增量变化曲线斜率越大。图 12 中轴向力增量变化趋势相似于滑移增

量变化,区别在于轴向力增量随着龄期的增加而反向增大。

为进一步考察均布荷载 $q$ 长期作用对界面滑移与轴向力的影响,图13和图14分别给出了不同连接刚度下滑移增量与轴向力增量随龄期变化曲线。

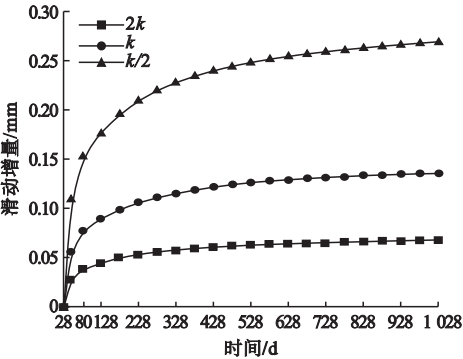


图13 不同连接刚度滑移增量-龄期变化曲线  
Fig. 13 Slip increment-age curves under different connection stiffness

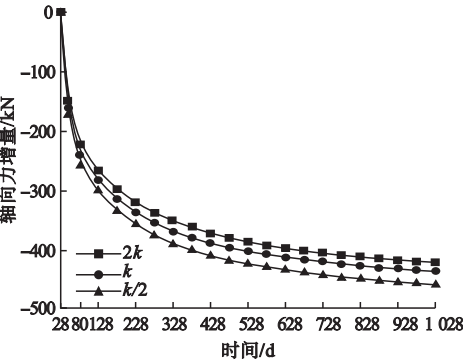


图14 不同连接刚度轴向力增量-龄期变化曲线  
Fig. 14 Axial force increment-age curves under different connection stiffness

图13和图14表明,不同连接刚度下界面滑移与轴向力增量随时间延长而逐渐增大,变化趋势呈非线性。80 d之前界面滑移增量与轴向力增量增长速率较大,完成量占加载总龄期的约50%;128 d左右,完成量约占总量的80%,之后增加速率较为缓慢。另外,随着滑移刚度的增大,界面滑移增量减小,且连接件刚度越大,二者曲线斜率越小。从图14还可以看出,80 d前滑移刚度的变化对于轴向力增量变化几乎没有影响。

4 结 论

(1)对比文献[10]数值方法,文中给出的徐变效应下曲线组合梁界面滑移与轴向力解析法有效可行、且精度高。

(2)不同龄期曲线组合梁界面滑移与轴向力变化曲线呈反对称与对称分布,前178 d滑移量约为总量80%,随着龄期的增长,滑移量与轴向力变化逐渐减缓。此外,曲线组合梁滑移最大值出现在梁端,跨中不发生纵向滑移,而轴向力于跨中出现最大值,梁端无轴向力;滑移量对不同平面弯曲转角变化的敏感度不大。

(3)界面滑移与轴向力增量随龄期发展呈非线性趋势增大,且二者增量均随刚度增大而减小,滑移刚度越大,曲线斜率变化越小,与荷载作用趋势恰好相反。另外,80 d前,滑移刚度变化对轴向力增量的影响可以忽略不计;128 d左右时,界面滑移与轴向力增量约为总变化量的80%。

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] 项贻强, 何超超, 邱政. 体外预应力钢-混凝土组合梁长期滑移计算[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017(51): 739-744.  
(XIANG Yiqiang, HE Chaochao, QIU Zheng. Calculation of long-term slippage for externally prestressing steel-concrete composite beam [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2017(51): 739-744.)

[3] 吕朝锋, 杨庆卫, 陈伟球. 收缩徐变对钢-混凝土组合梁弯曲变形的影响分析[J]. 建筑结构学报, 2010(7): 32-39.  
(Lü Chaofeng, YANG Qingwei, CHEN Weiqiu. Effects of shrinkage and creep strains on bending behavior of steel-concrete composite beams [J]. Journal of building structures, 2010(7): 32-39.)

[4] 孙建鹏, 刘银涛, 孙文武, 等. 端部不等高的钢-混凝土组合梁受力性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 202-211.  
(SUN Jianpeng, LIU Yintao, SUN Wenwu, et al. Experimental study on mechanical behavior of steel-concrete composite beams with variable



- height at the ends [J]. Journal of Shenyang Jianzhu university ( natural science ), 2020, 36 ( 2 ): 202 - 211. )
- [ 5 ] LIU X, BRADFORD M A, ERKMEN R E. Non-linear inelastic analysis of steel-concrete composite beams curved in-plan [J]. Engineering structures, 2013, 57: 484 - 492.
- [ 6 ] LIN W W, YODA T. Numerical study on horizontally curved steel-concrete composite beams subjected to hogging moment [J]. International journal of steel structures, 2014, 14 ( 3 ): 557 - 569.
- [ 7 ] ZHU L, SU R K L. Analytical solutions for composite beams with slip, shear-lag and time-dependent effects [J]. Engineering structures, 2017, 152: 559 - 578.
- [ 8 ] ERKMEN R E, BRADFORD M A. Time-dependent creep and shrinkage analysis of composite beams curved in-plan [J]. Computers and structures, 2011, 89 ( 1/2 ): 67 - 77.
- [ 9 ] 樊健生, 聂建国, 王浩. 考虑收缩、徐变及开裂影响的组合梁长期受力性能研究 ( I ) - 试验及计算 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 ( 3 ): 8 - 15.  
( FAN Jiansheng, NIE Jianguo, WANG Hao. Long-term behavior of composite beams with shrinkage, creep and cracking ( I ): experiment and calculation [J]. China civil engineering journal, 2009, 42 ( 3 ): 8 - 15. )
- [ 10 ] 樊健生, 聂鑫, 李全旺. 考虑收缩、徐变及开裂影响的组合梁长期受力性能研究 ( II ) - 理论分析 [J]. 土木工程学报, 2009, 42 ( 3 ): 16 - 22.  
( FAN Jiansheng, NIE Xin, LI Quanwang. Long-term behavior of composite beams with shrinkage, creep and cracking ( II ): theoretical analysis [J]. China civil engineering journal, 2009, 42 ( 3 ): 16 - 22. )
- [ 11 ] 朱力, 聂建国, 季文玉. 钢 - 混凝土组合箱型梁的滑移和剪力滞效应 [J]. 工程力学, 2016, 33 ( 9 ): 49 - 58.  
( ZHU Li, NIE Jianguo, JI Wenyu. Slip and shear-lag effects of steel-concrete composite box beam [J]. Engineering mechanics, 2016, 33 ( 9 ): 49 - 58. )
- [ 12 ] LIU X, BRADFORD M A, ERKMEN R E. Time-dependent response of spatially curved steel-concrete composite members. II: curved-beam experimental modeling [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139 ( 12 ): 04013004.
- [ 13 ] LIU X, 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.
- [ 14 ] SOUICI A, TEHAMI M, RAHAL N, et al. Creep effect on composite beam with perfect steel-concrete connection [J]. International journal of steel structures, 2015, 15 ( 2 ): 433 - 445.
- [ 15 ] GARA F, RANZI G, LEONI G. Short-and long-term analytical solutions for composite beams with partial interaction and shear-lag effects [J]. International journal of steel structures, 2010, 10 ( 4 ): 359 - 372.
- [ 16 ] NIE J G, CAI C S, ZHOU T R, et al. Experimental and analytical study of prestressed steel-concrete composite beams considering slip effect [J]. Journal of structural engineering, 2007, 133 ( 4 ): 530 - 540.
- [ 17 ] LIU X, BRADFORD M A, ERKMEN R E. Time-dependent response of spatially curved steel-concrete composite members. I: computational modeling [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139 ( 12 ): 1 - 11.
- [ 18 ] DIAS M M, TAMAYO J L P, MORSCH I B, et al. Time dependent finite element analysis of steel-concrete composite beams considering partial interaction [J]. Computers and concrete, 2015, 15 ( 4 ): 687 - 707.
- [ 19 ] 陈百玲, 李明姝, 刘文艺, 等. 工字形曲线组合梁负弯矩区侧向失稳分析 [J]. 沈阳建筑大学学报 ( 自然科学版 ), 2021, 37 ( 4 ): 586 - 593.  
( CHEN Bailing, LI Mingshu, LIU Wenwen, et al. Lateral buckling analysis of I - curve composite beams in negative moment region [J]. Journal of Shenyang jianzhu university ( natural science ), 2021, 37 ( 4 ): 586 - 593. )
- [ 20 ] 韩春秀, 周东华, 姚凯程, 等. 一种计算组合梁徐变和收缩效应的新方法 [J]. 华中科技大学学报 ( 自然科学版 ), 2017, 45 ( 8 ): 99 - 104.  
( HAN Chunxiu, ZHOU Donghua, YAO Kaicheng, et al. A new algorithm for creep and shrinkage effects of composite beams [J]. Journal of huazhong university of science and technology ( natural science ), 2017, 45 ( 8 ): 99 - 104. )
- [ 21 ] 何光辉. 混凝土徐变分析的龄期调整有效模量法及其应用 [J]. 建筑施工, 2019, 41 ( 2 ): 157 - 159.  
( HE Guanghui. Effective modulus method for age adjustment of concrete creep analysis and its application [J]. Building construction, 2019, 41 ( 2 ): 157 - 159. )
- [ 22 ] 姚玲森. 曲线梁 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.  
( YAO Lingsen. Curved beams [M]. Beijing: China Communications Press, 1989. )  
( 责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军 )