

文章编号:1671-8879(2013)01-0039-06

钢-混凝土组合梁界面滑移效应变分法求解

周勇超¹, 李亮亮², 李子青¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘 要:为了求解钢-混凝土组合梁的界面滑移效应,以弹性理论为基础,建立平衡方程;利用最小势能原理,结合变分方法,分别推导了简支钢-混凝土组合梁在受均布荷载和集中荷载时,组合梁的界面相对滑移、组合梁挠度以及附加弯矩的计算方法。结果表明:此方法使相对滑移微分方程基本形式得到统一;附加弯矩与相对滑移趋势成正比,而与相对滑移量无关;界面相对滑移量与抗滑移刚度、截面剪力有关,并且会增加组合梁挠度;简支组合梁相对滑移在梁两端部达到最大值,而向跨中减小。最后通过算例验证了给出的解析解的正确性。

关键词:桥梁工程;钢-混凝土组合梁;最小势能原理;变分方法;滑移;附加弯矩

中图分类号:U441.2

文献标志码:A

Solution of slip effect of steel-concrete composite beam with variational principles

ZHOU Yong-chao¹, LI Liang-liang², LI Zi-qing¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design & Research, Hangzhou 310006, Zhejiang, China)

Abstract: In order to solve the simple steel-concrete composite beam interface slip effect, the balance equation was built with the theory of elasticity. The analytic expressions of interface slip and deformation, which were caused by point load or distributed load, were derived by using the principle of minimum potential energy and variational method. The method for calculating additional bending moment was derived, too. The results show that the method unifies the basic form of the relative slip differential equation. Additional moment has nothing to do with the amount relative slip, while it is proportional to the trend of relative slip. Relative slip is associated with anti-slip and the cross-section shear, and will increase the deflection of composite beam. While the maximum interfacial slip is at the end of beam and decreases to zero at the mid-span. The suggested formulas are in good agreement with the measured results. 7 figs, 15 refs.

Key words: bridge engineering; steel-concrete composite beam; the principle of minimum potential energy; variational method; interfacial slip; additional bending moment

0 引言

钢-混凝土组合梁在桥梁、建筑等领域中得到了

越来越广泛的应用,它扬长避短、充分利用了 2 种材料的优点,具有承载力高、刚度大、抗震性能和耐火性能好、稳定性高等优点。对于这种结构的研究,国

收稿日期:2012-01-20

基金项目:交通运输部交通运输行业联合科技攻关项目(2010353333140)

作者简介:周勇超(1977-),男,陕西西安人,讲师,工学博士研究生,E-mail:zyc_zeus@126.com。

内外学者已经做了大量的工作,主要集中在以下领域:聂建国等通过试验,结合弹性分析理论研究了简支钢-混凝土组合梁的强度、刚度计算方法,并提出了部分抗剪连接的概念^[1];Liang 等利用有限元方法,分析了组合梁在弯-剪复合受力状态下的力学行为,指出混凝土板对组合梁的横向抗剪有一定贡献,计算时不应将其忽略^[2];Sameh 等通过试验证明增长组合梁界面处剪力键之间的距离、适当减少剪力键个数是可行的^[3];Gunup 等研究了通过植入剪力键的方法可以加固钢-混凝土板非组合结构,试验表明这种加固方法可以提高钢-混凝土板非组合结构的强度、刚度和延性^[4];Andrea 等通过有限元结合模型试验的方法研究了预应力连续钢-混凝土组合梁,并注意到剪力键的变形对其力学行为的影响^[5]。

组合梁之所以有较优异的性能,这与其在钢与混凝土的交界面设置可靠的抗剪连接件密不可分。这种结构的行为很大程度上取决于钢与混凝土之间的连接程度。然而,完全刚性的抗剪连接是无法实现的,在多数情况下,2 种材料只是部分协调工作,即使是完全抗剪连接,交界面上的相对滑移效应仍然存在,且它将对组合梁弹性受弯承载能力以及刚度都有较大影响。因此,在对组合梁进行分析时必须考虑其界面相对滑移效应已被众多学者所认同。

国内外对于钢-混凝土组合梁界面滑移效应研究较系统的有:聂建国等通过模型试验,结合力法,并认为界面相对滑移沿梁高线性分布,分析了滑移效应对组合梁弯曲强度、刚度的影响,并给出了相应的计算方法^[6];孙飞飞等分别在不同时期,利用模型试验,结合有限元或弹性力学分析方法,得到了在不同荷载形式作用下,组合梁界面滑移的计算方法以及组合梁强度、刚度等的计算方法^[7-12];Paplo 放弃交界面上剪应力与应变的相对关系,而是采用剪应力-滑移应变曲线来非线性分析滑移效应,所得结果与实测吻合较好^[13];Rongqiao 等利用虚功原理,推导了在考虑滑移效应的组合梁内力计算方法,同时也证明了最小势能原理,并得到了弯曲、振动以及屈曲的近似解^[14]。以上的研究多采用试验与理论相结合的方法,利用弹性力学关系,建立平衡微分方程进行求解。然而,这种方法推导复杂,涉及参数较多,解析求解困难。为此,本文利用变分方法,结合最小势能原理,推导了简支组合梁在受集中荷载和均布荷载作用下相对滑移以及考虑滑移效应组合梁挠度的计算方法,并与传统方法相比。此方法过程简单,意义明确,求解高效。通过算例验证,其计算

结果与实测结果吻合良好,为工程技术人员提供了一种新的求解思路。

1 组合梁相对滑移模型

1.1 基本假定

通常情况下,组合梁在正常使用状态下处于弹性工作阶段,这一结果已被大量的试验结果所证实。因此,为了计算简洁,将组合梁视为理想弹性体,同时,还作如下基本假设:①不考虑剪切变形的影响,组合梁的跨度一般情况下远大于组合梁高度,属于“细长”结构,可以忽略组合梁中横向剪切变形的影响;②尽管认为组合梁界面处存在相对滑移,但仍然假设混凝土翼板与钢梁各自符合平截面假定,即变形后截面仍与中性轴垂直,只是钢梁与混凝土板之间有相对滑移差;③相对滑移量与抗剪连接刚度成反比,与界面剪力成正比;④认为组合梁中混凝土翼板与钢梁变形后曲率一致,即不考虑二者之间的抛起作用。

1.2 基本微分方程

如图 1(a)所示,坐标系如图 1 所示, G_u, G_s, G_c 分别为组合梁、钢梁、混凝土翼板的截面形心;混凝土翼板厚 h_c ,板宽 $\xi_2 b$,形心到 z 轴距离为 y_c ;钢梁顶板、底板厚度分别为 t_{s1}, t_{s2} ,宽度分别为 $\xi_1 b, b$;到组合梁形心的距离分别为 y_{st}, y_{sb} ;腹板厚为 t_w ; y_{sw} 为腹板到 z 轴距离。取组合梁一微段 dx ,图(1)b 中, N, M, V 分别表示组合梁中的轴力、弯矩、剪力,下标“c”表示混凝土;“s”表示钢梁;“+”表示增量。

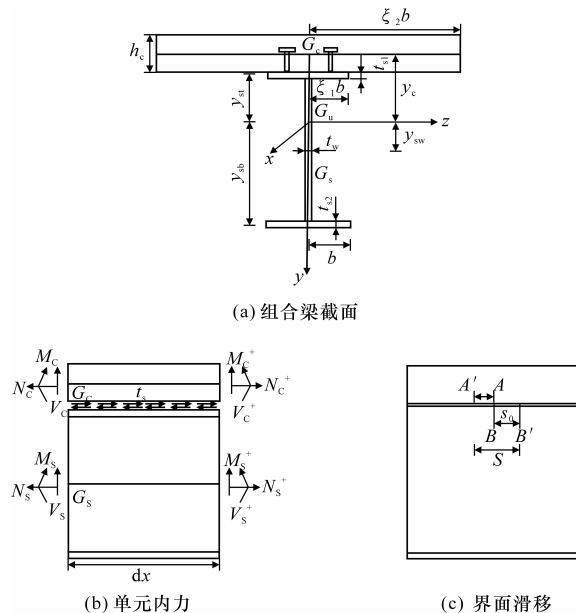


图 1 组合梁微单元

Fig. 1 Elements of steel-concrete composite beam

根据水平力平衡可得 $\frac{dN_c}{dx} = \frac{dN_s}{dx}$ 。根据物理关系可得

$$E_c A_c \epsilon_c = E_s A_s \epsilon_s \quad (1)$$

式中: E_c 、 A_c 、 ϵ_c 和 E_s 、 A_s 、 ϵ_s 分别为混凝土板与钢梁的弹性模量、截面面积、材料的轴向应变。

对与原本坐标位置重合但分别处于混凝土和钢梁内的 A、B 两点,如图 1(c) 所示,在受荷载作用之后,发生了相对滑移,分别发生了相对变形 S_{cA} 、 S_{sB} ,则相对滑移距离 $S = S_{cA} - S_{sB}$,则相对滑移应变为

$$S' = S'_{cA} - S'_{sB} = \epsilon_{cA} - \epsilon_{sB} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得

$$\begin{cases} \epsilon_{cA} = \rho_A S' \\ \epsilon_{sB} = \rho_B S' \end{cases}$$

其中

$$\begin{cases} \rho_A = \frac{E_s A_s}{E_c A_c + E_s A_s} \\ \rho_B = \frac{E_c A_c}{E_c A_c + E_s A_s} \end{cases}$$

假设组合梁在外荷载作用下截面形心处挠度为 w ,由假设①可知,截面任意一点的应变为 $\epsilon = w''y$, y 为任意一点到组合梁中心轴竖向距离。下面分别计算体系的各项势能。

(1) 组合梁受弯时的荷载势能 \bar{V}

$$\bar{V} = \int_0^l q(x) w dx$$

当组合梁受纯弯时

$$\bar{V} = \int_0^l M(x) w'' dx \quad (3)$$

式中: $q(x)$ 为均布荷载; $M(x)$ 为弯矩。

(2) 相对滑移势能 \bar{U}_s

$$\bar{U}_s = \frac{1}{2} \int_0^l K S^2 dx \quad (4)$$

式中: K 为交界面上的抗滑移刚度。

(3) 混凝土板势能 \bar{U}_c

$$\bar{U}_c = 2 \times \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^{\xi_2 b} E_c (\epsilon_c + \epsilon_{cs})^2 h_c dx dz \quad (5)$$

由前面可知 $\epsilon_c = w''y_c$, $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cA} = \rho_A S'$, 令 $I_c = \int_0^{\xi_2 b} y_c^2 h_c dz$, 代入式(5), 可得

$$\bar{U}_c = \int_0^l E_c I_c (w''^2 + \frac{2\rho_A w'' S'}{y_c} + \frac{\rho_A^2 S'^2}{y_c^2}) dx \quad (6)$$

(4) 钢梁翼板势能

对于上翼板而言,其势能 \bar{U}_{s1} 为

$$\bar{U}_{s1} = 2 \times \frac{1}{2} \int_0^l \int_0^{\xi_1 b} E_s (\epsilon_{s1} + \epsilon_{ss1})^2 t_{s1} dx dz \quad (7)$$

同理可知, $\epsilon_{s1} = w''y_{s1}$, $\epsilon_{ss1} = \epsilon_{sB} = \rho_B S'$, 令 $I_{s1} = \int_0^{\xi_1 b} y_{st}^2 t_{s1} dz$, 代入式(7), 可得

$$\bar{U}_{s1} = \int_0^l E_s I_{s1} (w''^2 + \frac{2\rho_B w'' S'}{y_{st}} + \frac{\rho_B^2 S'^2}{y_{st}^2}) dx \quad (8)$$

令 $I_{s2} = \int_0^b y_{sb}^2 t_{s2} dz$, 钢梁底板势能 \bar{U}_{s2} 为

$$\bar{U}_{s2} = \int_0^l E_s I_{s3} (w''^2 + \frac{2\rho_B w'' S'}{y_{sb}} + \frac{\rho_B^2 S'^2}{y_{sb}^2}) dx \quad (9)$$

(5) 钢梁腹板势能

对于腹板而言,有

$$\bar{U}_{s3} = \frac{1}{2} \int_0^l \int_{y_{sb}}^{y_{st}} E_s (\epsilon_{sw} + \epsilon_{ssw})^2 t_w dx dy \quad (10)$$

式中: $\epsilon_{sw} = w''y_{sw}$; $\epsilon_{ssw} = \rho_B S'$ 。

令 $I_{s3} = \int_{y_{sb}}^{y_{st}} y_{sw}^2 t_w dy$, 代入式(10), 可得腹板势能为

$$\bar{U}_{s3} = \frac{1}{2} \int_0^l E_s I_{s3} (w''^2 + \frac{2\rho_B w'' S'}{y_{sw}} + \frac{\rho_B^2 S'^2}{y_{sw}^2}) dx \quad (11)$$

由以上计算可知,结构体系总势能为

$\Pi = \bar{V} + \bar{U}_s + \bar{U}_c + \bar{U}_{s1} + \bar{U}_{s2} + \bar{U}_{s3}$, 即

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_0^l (E_1 I_1 w''^2 + 2E_2 I_2 w'' S' + E_3 I_3 S'^2 + 2M(x) w'' + K S^2) dx \quad (12)$$

其中

$$E_1 I_1 = 2(E_c I_c + E_s I_{s1} + E_s I_{s2} + \frac{1}{2} E_s I_{s3}) \quad (13)$$

$$E_2 I_2 = \frac{2\rho_A}{y_c} E_c I_c + \frac{2\rho_B}{y_{st}} E_s I_{s1} + \frac{2\rho_B}{y_{sb}} E_s I_{s2} + \frac{\rho_B}{y_{sw}} E_s I_{s3} \quad (14)$$

$$E_3 I_3 = 2(\frac{\rho_A^2}{y_c^2} E_c I_c + \frac{\rho_B^2}{y_{st}^2} E_s I_{s1} + \frac{\rho_B^2}{y_{sb}^2} E_s I_{s2} + \frac{\rho_B^2}{2y_{sw}^2} E_s I_{s3}) \quad (15)$$

根据最小势能原理,在外力作用下,处于稳定平衡状态的弹性体,在满足边界条件的所有位移中,实际上存在一组位移,能使整个系统的总势能最小,即体系总势能一阶变分为 0,即

$$\delta \Pi = \delta(\bar{V} + \bar{U}) = \int_0^l \{ [E_1 I_1 w'' + E_2 I_2 S' + M(x)] \delta w'' + (E_2 I_2 w'' + E_3 I_3 S') \delta S' + K S \delta S \} dx = 0$$

通过分部积分,可得控制微分方程及边界条件为

$$E_1 I_1 w'' + E_2 I_2 S' + M(x) = 0 \quad (16)$$

$$E_2 I_2 w''' + E_3 I_3 S'' - K S = 0 \quad (17)$$

$$\delta S(0) (E_2 I_2 w''(0) + E_3 I_3 S'(0)) = 0 \quad (18)$$

$$\delta S(l)(E_2 I_2 w''(l) + E_3 I_3 S'(l)) = 0 \quad (19)$$

将式(16)求一阶导数,联合式(17),消除 w'''

$$\text{项,若令 } r_1^2 = \frac{KE_1 I_1}{(E_1 I_1)(E_3 I_3) - (E_2 I_2)^2},$$

$r_2 = \frac{E_2 I_2}{(E_1 I_1)(E_3 I_3) - (E_2 I_2)^2}$,则可得相对滑移控制微分方程为

$$S'' - r_1^2 S = r_2 Q(x) \quad (20)$$

式中: $Q(x)$ 为任意截面处剪力值。

由式(20)可知,界面相对滑移与抗剪滑移刚度、截面剪力有关。

将式(16)变形可得挠度控制微分方程为

$$w'' = \frac{1}{E_1 I_1} (M(x) + M_s(x))$$

式中: $M_s(x)$ 为由相对滑移引起的附加弯矩,其大小为 $M_s(x) = E_2 I_2 S'$ 。

将式(16)与不考虑相对滑移计算得出的微分方程作比较,多了附加弯矩的影响。因此,组合梁相对滑移效应会引起挠度增大,降低组合梁刚度。附加弯矩与相对滑移的趋势(即相对滑移一阶导数)成正比,而与相对滑移的大小无关。

2 特定荷载形式下组合梁控制微分方程求解

2.1 组合梁受均布荷载作用

如图2所示,跨径为 l 的一简支组合梁,作用均布荷载 q ,则任意截面的弯矩为 $M(x) = \frac{q}{2}x(l-x)$,剪力 $Q(x) = \frac{q}{2}(l-2x)$,代入式(20)可得

$$S'' - r_1^2 S = r_2 \frac{q}{2}(l-2x) \quad (21)$$

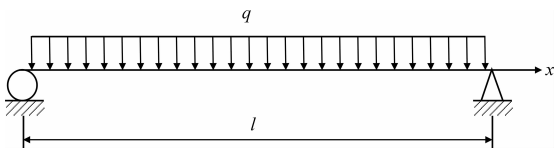


图2 组合梁承受均布荷载

Fig. 2 Composite beam subject to distributed load

可解得相对滑移的通解为: $S = C_1 e^{r_1 x} + C_2 \cdot$

$e^{-r_1 x} - \frac{qr_2}{2r_1^2}(l-2x)$,由边界条件 $S'(0) = S'(l) = 0$

可得系数 $C_1 = \frac{-r_2 q}{r_1^3(e^{r_1 l} + 1)}$, $C_2 = \frac{-r_2 q e^{r_1 l}}{r_1^3(e^{r_1 l} + 1)}$,则均

布荷载作用下组合梁界面滑移为

$$S = \frac{r_2 q}{r_1^3(e^{r_1 l} + 1)}(e^{r_1(1-x)} - e^{r_1 x}) - \frac{qr_2}{2r_1^2}(l-2x) \quad (22)$$

相对滑移引起的附加弯矩为

$$M_s(x) = E_2 I_2 S' = \frac{E_2 I_2 r_2 q}{2r_1^2(e^{r_1 l} + 1)}(e^{r_1 l} - e^{r_1 x} - e^{r_1(l-x)} + 1) \quad (23)$$

将式(23)代入挠度微分方程,积分后可得挠度计算式为

$$w = -\frac{1}{E_1 I_1} \left[\left(-\frac{qx^4}{24} + \frac{qlx^3}{12} \right) - E_2 I_2 r_2 q (e^{-r_1 x} + \frac{x^2}{2r_1^2} + \frac{e^{r_1 x} - e^{-r_1 x}}{r_1^4(e^{r_1 x} + 1)}) + C_3 x + C_4 \right] \quad (24)$$

由边界条件 $w(0) = w(l) = 0$ 可得

$$C_3 = -\frac{ql^3}{24} + \frac{E_2 I_2 r_2 q}{l}(e^{-r_1 l} + \frac{l^2}{2r_1^2} + \frac{e^{r_1 l} - e^{-r_1 l}}{r_1^4(e^{r_1 l} + 1)} - \frac{E_2 I_2 r_2 q}{l}, C_4 = E_2 I_2 r_2 q$$

2.2 组合梁受集中荷载作用

如图3所示,集中荷载 P 作用于距离梁端 ξ 处,可解得梁截面内力为:当 $0 \leq x \leq \xi$ 时, $Q(x) = \frac{l-\xi}{l}P$, $M(x) = \frac{l-\xi}{l}Px$;当 $\xi \leq x \leq l$ 时, $Q(x) = -\frac{\xi}{l}P$, $M(x) = \frac{\xi P}{l}(l-x)$ 。由式(20)可得,当 $0 \leq x \leq \xi$ 时,组合梁界面相对滑移的通解为

$$S_1 = C_5 e^{r_1 x} + C_6 e^{-r_1 x} - \frac{r_2}{r_1^2} Q(x) = \frac{l-\xi}{l}P \quad (25)$$

当 $\xi \leq x \leq l$ 时

$$S_2 = C_7 e^{r_1 x} + C_8 e^{-r_1 x} + \frac{r_2}{r_1^2} Q(x) = \frac{\xi}{l}P \quad (26)$$

由边界条件及相对滑移的连续性得: $S'_1(0) = S'_2(l) = 0$, $S_1(\xi) = S_2(\xi)$, $S'_1(\xi) = S'_2(\xi)$

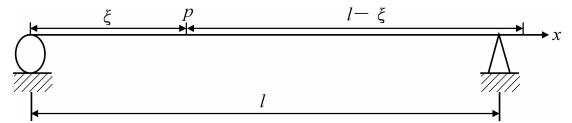


图3 组合梁承受集中荷载

Fig. 3 Composite beam subject to point load

可解得各系数为

$$\begin{bmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{r_1 l} & e^{-r_1 l} \\ e^{r_1 \xi} & e^{-r_1 \xi} & -e^{r_1 \xi} & -e^{-r_1 \xi} \\ e^{r_1 \xi} & -e^{-r_1 \xi} & -e^{r_1 \xi} & e^{-r_1 \xi} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r_2}{r_1^2} P \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_2 P}{2r_1^2 \cosh(r_1 \xi)} (1 - \frac{\sinh(r_1 \xi)(e^{r_1(l-\xi)} + e^{-r_1(l-\xi)})}{2 \sinh(r_1 l)}) \\ \frac{r_2 P}{2r_1^2 \cosh(r_1 \xi)} (1 - \frac{\sinh(r_1 \xi)(e^{r_1(l-\xi)} + e^{-r_1(l-\xi)})}{2 \sinh(r_1 l)}) \\ -\frac{r_2 P \sinh(r_1 \xi)(\cosh(r_1 l) - \sinh(r_1 l))}{2r_1^2 \sinh(r_1 l)} \\ -\frac{r_2 P e^{r_1(2l-\xi)}(e^{2r_1 \xi} - 1)}{2r_1^2(e^{2r_1 l} - 1)} \end{bmatrix}$$

当 $0 \leq x \leq \xi$ 时,相对滑移引起的附加弯矩为

$$M_{s1} = E_2 I_2 S'_1 = E_2 I_2 r_1 C_5 (e^{r_1 x} - e^{-r_1 x}) \quad (27)$$

当 $\xi < x \leq l$ 时,相对滑移引起的附加弯矩为

$$M_{s2} = E_2 I_2 S'_2 = E_2 I_2 r_1 (C_7 e^{r_1 x} - C_8 e^{-r_1 x}) \quad (28)$$

将式(27)、式(28)代入挠度微分方程,积分后可得挠度计算式为

当 $0 \leq x \leq \xi$ 时,挠度为

$$w_1 = \frac{1}{E_1 I_1} \left(\frac{1-\xi}{6l} P x^3 + \frac{2E_2 I_2}{r_1} C_5 \sinh(r_1 x) + C_9 x + C_{10} \right) \quad (29)$$

当 $\xi < x \leq l$ 时,挠度为

$$w_2 = \frac{1}{E_2 I_2} \left(\frac{\xi P}{6l} (1-x)^3 + \frac{E_2 I_2}{r_1} (C_7 e^{r_1 x} - C_8 e^{-r_1 x} + C_{11} x + C_{12}) \right) \quad (30)$$

由边界条件 $w_1(0) = w_2(l) = 0, w_1(\xi) = w_2(\xi)$ 及 $w_1(\xi) = w_2(\xi)$ 。再令

$$\Delta_1 = \frac{E_2 I_2}{r_1 E_1 I_1} (C_7 e^{r_1 l} - C_8 e^{-r_1 l}), \Delta_2 = \frac{E_2 I_2}{r_1} [C_7 e^{r_1 \xi} -$$

$C_8 e^{-r_1 \xi} - 2C_5 \sinh(r_1 \xi)], \Delta_3 = E_2 I_2 [C_7 e^{r_1 \xi} - C_8 e^{-r_1 \xi} - 2C_5 \cosh(r_1 \xi)],$ 可得未知系数 $C_9 \sim C_{12}$ 为

$$\begin{bmatrix} C_9 \\ C_{10} \\ C_{11} \\ C_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l & 1 \\ \xi & 1 & -\xi & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta_1 \\ \frac{l-\xi}{3} P \xi + \Delta_2 \\ \frac{P \xi (1-\xi)(l-2\xi)}{2l} + \Delta_3 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\Delta_1}{l} - \frac{\Delta_2 + P \xi (l-\xi)/3}{l} + \frac{(l+\xi)(\Delta_3 + P \xi (l-\xi)(l-2\xi)/2l)}{l} \\ \frac{\Delta_1}{l} - \frac{\Delta_2 + P \xi (l-3)/3}{l} + \frac{\xi(\Delta_3 + P \xi (l-\xi)(l-2\xi)/2l)}{l} \\ \Delta_2 - \frac{\xi}{3} [\Delta_3 + \frac{P \xi (l-\xi)(l-2\xi)}{2l} + P \xi (l-\xi)] \end{bmatrix}$$

3 算例分析

参照参考文献[15]的试验研究结果,以文献中编号为 SCB-8 的简支钢混组合梁为算例,截面尺寸如图 4 所示,计算跨径 $l=2\,560\text{ mm}$ 。

取抗剪滑移刚度 $K=4.675 \times 10^7\text{ N/mm}$,分别计算了在均布荷载和集中荷载作用下组合梁的挠度以及相对滑移,计算结果与实测结果如图 5~图 7 所示。

由以上计算结果可知,考虑滑移效应计算所得结构挠度与实测结果相吻合,较不考虑滑移效应的计算结果偏大。滑移效应的影响随着荷载的增加而变得明显。因此,对于考虑钢-混凝土组合梁的极限

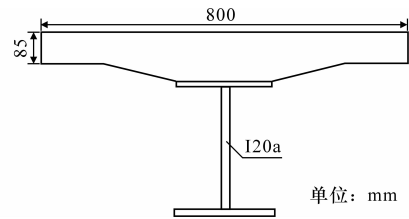


图 4 组合梁截面尺寸

Fig. 4 Composite beam section dimension

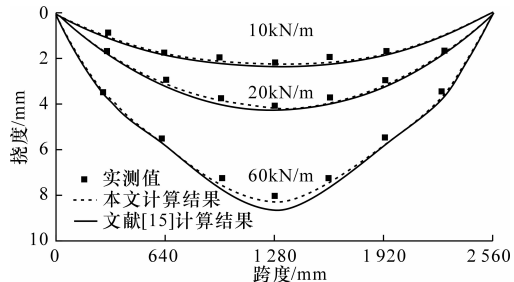


图 5 均布荷载作用下的挠度

Fig. 5 Deflection subject to distributed loads

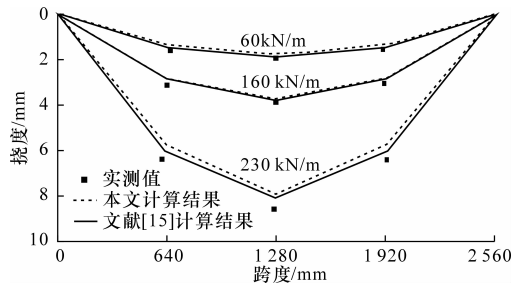


图 6 集中荷载作用下的挠度

Fig. 6 Deflection subject to point loads

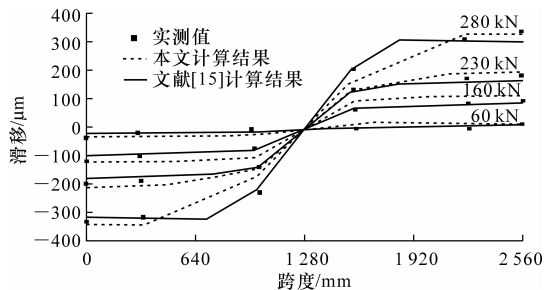


图 7 集中荷载作用下的滑移

Fig. 7 Slip subject to point loads

承载力时,滑移效应的影响不可不计。滑移量向梁两端增大达到最大值而向跨中部位减小。本文滑移计算结果与实测结果在结构的弹性阶段吻合良好,趋势一致。

4 结 语

(1)以弹性理论为基础,利用最小势能原理,结合变分法,推导了简支钢-混凝土组合梁在受均布荷

载或集中荷载作用下结构挠度以及滑移量的解析表达式,计算结果与试验数据吻合较好。

(2)利用结构力学的概念,引入了由相对滑移引起的附加弯矩,使得滑移效应对结构的影响更利于工程分析。在实际结构分析中,可将滑移效应分开考虑,即计算滑移产生的附加弯矩,从而可求得相应的附加挠度,这大大简化了分析过程,便于编制相关程序。

(3)没有考虑横向剪切效应,这对于“细长”结构的影响可以忽略,但若是跨度较小而高度较大的组合梁,则需考虑横向剪切的影响。

参考文献:

References:

- [1] 聂建国,李勇,余志武,等. 钢—混凝土组合梁刚度的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(10): 38-41.
NIE Jian-guo, LI Yong, YU Zhi-wu, et al. Study on short and long-term rigidity of composite[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(10): 38-41. (in Chinese)
- [2] Liang Q Q, Brian U Y, Bradford M A, et al. Strength analysis of steel-concrete composite beams in combined bending and shear[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(10): 1593-1600.
- [3] Sameh S B, Amgad F M G, Maher K T, et al. Full-scale testing for composite slab/beam systems made with extended stud spacing[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(5): 653-661.
- [4] Gunup K, Michael D E, Richard E K. Experimental behavior of bridge beams retrofitted with postinstalled shear connectors[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4): 536-545.
- [5] Andrea D A, Alessandro Z. Finite element model for externally prestressed composite beams with deformable connection[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(5): 706-714.
- [6] 聂建国,沈聚敏. 滑移效应对钢-混凝土组合梁弯曲强度的影响及其计算[J]. 土木工程学报, 1997, 30(1): 31-36.
NIE Jian-guo, SHEN Ju-min. Slip effect on strength or composite steel-concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(1): 31-36. (in Chinese)
- [7] 孙飞飞,李国强. 考虑滑移、剪力滞后和剪切变形的钢-混凝土组合梁解析解[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 96-103.

- SUN Fei-fei, LI Guo-qiang. A closed-form solution for steel-concrete composite beams with slip, shear lag and shear deformation[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 96-103. (in Chinese)
- [8] 余志武,蒋丽忠,李佳. 集中荷载作用下钢-混凝土组合梁界面滑移及变形[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 1-6.
YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong, LI Jia. The interface slip and deformation of steel-concrete composite beams under concentrated loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8): 1-6. (in Chinese)
- [9] 胡夏闽,薛伟,曹雪娇. 钢-混凝土组合梁挠度计算的附加曲率法[J]. 建筑结构学报, 2010(增1): 385-389.
HU Xia-min, XUE Wei, CAO Xue-jiao. The additional curvature method for calculating deflection of composite steel-concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2010(S1): 385-389. (in Chinese)
- [10] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘结-滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 44-51.
ZHAO Wei-ping. Bond-slip numerical simulation based on ANSYS contact analysis[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 44-51. (in Chinese)
- [11] 赵卫平. 基于 ANSYS 接触分析的粘结-滑移数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(2): 44-51.
ZHAO Wei-ping. Bond-slip numerical simulation based on ANSYS contact analysis[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(2): 44-51. (in Chinese)
- [12] Simon S, Miran S, Goran T, et al. Analytical solution of two-layer beam taking into account interlayer slip and shear deformation[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(6): 886-894.
- [13] Paolo F. Analytical solution of two-layer beam taking into account nonlinear interlayer slip[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(10): 1129-1146.
- [14] Rongqiao X, Dequan C. Variational principles of partial-interaction composite beams[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(5): 542-551.
- [15] 周凌云,余志武,蒋丽忠. 钢-混凝土组合梁界面滑移剪切变形的双重效应分析[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 104-109.
ZHOU Ling-yu, YU Zhi-wu, JIANG Li-zhong. Analysis of composite beams of steel and concrete with slip and shear deformation[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 104-109. (in Chinese)