

文章编号:1673-2049(2013)02-0114-07

钢-混凝土组合梁界面滑移与剪力滞耦合效应分析

周勇超¹, 李常乐², 孙铁军³, 李子青¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通建设集团公司, 陕西 西安 710075;
3. 温州市交通投资集团有限公司, 浙江 温州 325000)

摘要:通过定义组合梁截面翘曲位移函数和广义相对滑移函数,利用最小势能原理和变分方法,推导了组合梁在受到相对滑移和剪力滞耦合效应时,其挠度、相对滑移、剪力滞系数的计算通式,并进一步给出了简支钢-混凝土组合梁在均布荷载作用下挠度、相对滑移和剪力滞系数的解析解。分析结果表明:组合梁挠度和剪力滞系数都与相对滑移量和混凝土板最大转角位移差无关,而与相对滑移趋势以及相对转动趋势成正比;相对滑移受到翘曲位移函数的影响。本文计算结果与有限元法结果吻合良好。

关键词:钢-混凝土组合梁;界面滑移与剪力滞耦合效应;最小势能原理;变分方法;挠度

中图分类号:U488.41 文献标志码:A

Coupling Effect Analysis of Interface Relative Slip and Shear Lag of Steel-concrete Composite Beam

ZHOU Yong-chao¹, LI Chang-le², SUN Tie-jun³, LI Zi-qing¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China; 3. Wenzhou Communications Investment Group Co., Ltd., Wenzhou 325000, Zhejiang, China)

Abstract: By the definition of the composite beam warping displacement function and general relative slip function, using the principle of the minimum potential energy and the variation method, the general formula of deflection, relative slip and shear lag coefficient were derived under the coupling effect of relative slip and shear lag. Moreover, the closed-form solutions for simply supported steel-concrete composite beam with deflection, relative slip and shear lag coefficient were deduced under uniformly distributed loads. The analysis results show that the deflection and shear lag coefficient of composite beam have nothing to do with relative slip value and the maximum angular displacement difference of the concrete slab, while they are proportional to the trend of relative slip and rotation angle. Relative slip is affected by warping displacement function. The calculation results in the paper agree well with the finite element method results.

Key words: steel-concrete composite beam; coupling effect of interface relative slip and shear lag; principle of minimum potential energy; variational method; deflection

收稿日期:2013-01-15

基金项目:交通运输部行业联合科技攻关项目(2010 353 333 140)

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:13892835952@126.com。

0 引言

钢-混凝土组合梁是通过抗剪连接件将钢梁与混凝土翼板组合在一起协调工作的结构,这种结构由于能够更好地发挥 2 种材料的优点,同时还兼有良好的施工性能、耐久性、经济性等优点,被广泛地应用于桥梁、建筑工程中^[1]。钢-混凝土组合梁截面通常为 T 形或箱形结构,研究表明,这种带有纵肋的结构剪力滞效应非常显著。对于剪力滞效应的求解,常用的方法有比拟杆法、能量变分法、有限条法、有限差分法等^[2-4],其中,以能量法为基础,结合变分原理的分析法方深受广大科研人员喜爱,它未知数少,力学概念清晰,推导效率高。然而以往的研究仅针对一种材料,而少有对复合材料剪力滞效应的分析研究。钢-混凝土组合结构恰恰是 2 种材料的混合物,对于这样的结构,通常是通过有效分布宽度来解决组合梁的剪力滞效应^[5-7],但此方法缺乏合理的理论支持,因此,对钢-混凝土组合结构剪力滞效应的分析是十分必要的。

另一方面,对于这种结构,众多学者做了大量的试验和理论分析工作^[8-9],研究表明,钢-混凝土组合梁界面之间的抗剪连接效果对组合梁的力学性能起着至关重要的作用^[10-11]。然而,不存在完全刚性的抗剪连接,即便是完全抗剪连接设计的组合梁,界面滑移依然存在,而且这个滑移将会对组合梁的刚度、承载力等有重要影响^[12-13],因此,组合梁界面滑移效应分析是组合梁研究中必不可少的一部分。对于钢-混凝土组合梁界面滑移效应,以往的研究方法有^[14-15]:①通过模型试验,结合弹性分析,推导滑移效应;②利用有限元的方法进行求解;③利用能量法,结合变分原理进行求解。这几种方法均取得了较好的结果。目前,对滑移效应的研究集中在滑移量的计算方法和对组合梁性能影响的分析上,只是孤立地考虑滑移效应这一单一因素,而没有综合考虑它与剪力滞的耦合作用。

钢-混凝土组合梁兼有滑移、剪力滞双重效应,分析时忽略任何一方都是不全面的,且组合梁滑移和剪力滞是 2 个相互耦合的效应,二者互为影响,因此综合考虑 2 种效应的耦合作用对于组合梁的分析是尤为重要的。本文中笔者以此为切入点,提出一个同时考虑相对滑移和剪力滞效应的钢-混凝土组合梁模型,推导其解析解,并通过算例进行了验证。

1 计算模型

1.1 基本假定

在正常使用阶段,钢-混凝土组合梁处于弹性工作阶段,这一结果已被大量试验结果所证明。因此,可视组合梁为理想弹性体,此外,还做如下基本假定:①在对称竖向荷载作用下,钢-混凝土组合梁截面中性轴位于按初等梁理论计算的形心位置;②组合梁界面处存在相对滑移,相对滑移量与抗剪连接刚度成反比,混凝土与钢梁界面之间仅靠剪力键连接,不考虑混凝土与钢梁的粘结作用;③钢梁与混凝土翼板之间仅有纵向存在相对滑移,横向相对滑移忽略不计;④由于翼板的竖向应变、横向应变以及平板外的剪切应变极其微小,计算应变能时可以忽略此部分效应;⑤认为组合梁中混凝土板与钢梁变形后的曲率一致,即不考虑二者的掀起作用。

1.2 基本微分方程

图 1 为任意钢-混凝土组合梁截面。图 1 中, h_c 为混凝土板厚度, b_1 为混凝土板宽度的一半, Z_{cs} 为混凝土板截面形心到组合梁截面形心的距离, b_2, b_3 分别为钢梁的顶板和底板宽度的一半, Z_{ss}, Z_{sx} 分别为钢梁的顶板和底板截面形心到组合梁截面形心的距离。在外荷载作用下,钢梁与混凝土各自伸缩, u_s, u_c 均为任意截面纵向位移,广义相对滑移量 $S(x) = u_c - u_s$ 。根据组合梁应保持轴力自平衡,可得组合梁纵向滑移函数 $g(y, z)$ 为

$$g(y, z) = \begin{cases} -\frac{nA_s}{A_c + nA_s} & \text{混凝土梁} \\ \frac{A_c}{A_c + nA_s} & \text{钢梁} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_c, A_s 分别为混凝土翼板与钢梁的截面面积; $n = E_s/E_c, E_s, E_c$ 分别为钢材和混凝土的弹性模量。

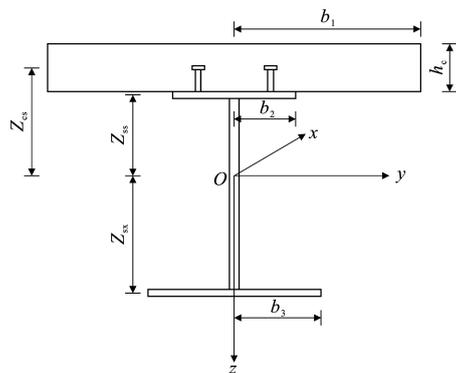


图 1 组合梁截面

Fig. 1 Section of Composite Beam

由此可得,钢-混凝土组合梁相对滑移模式为

$g(y, z)S(x)$ 。同时,可定义钢-混凝土组合梁剪力滞翘曲位移模式为 $h(y, z)U(x)$, 其中, $h(y, z)$ 为翘曲位移函数, $U(x)$ 为截面剪力滞广义翘曲位移, 通常指混凝土翼板与钢梁顶板最大纵向位移差函数。组合梁截面的滑移与翘曲位移如图 2 所示。

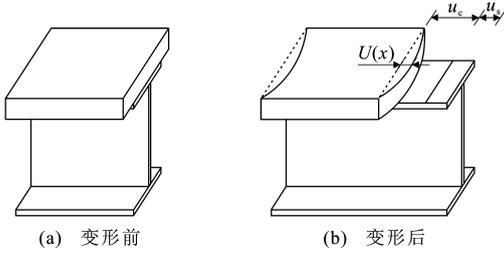


图 2 组合梁截面的滑移与翘曲位移

Fig. 2 Slip and Warping Displacement of Composite Beam Section

此处,采用经典三次抛物线来定义翘曲位移函数 $h(y, z)$, 即

$$h(y, z) = Z \left[1 + \left(\frac{y}{b_i} \right)^3 \right] \quad i=1, 2, 3 \quad (2)$$

式中: Z 为各部位截面形心到组合梁截面形心的距离。

组合梁纵向位移由截面形心整体位移、翼板翘曲位移和界面相对滑移 3 个部分构成, 则水平纵向位移 $u(x, y, z)$ 的表达通式为

$$u(x, y, z) = -zw'(x) + h(y, z)U(x) + g(y, z)S(x) \quad (3)$$

式中: $w(x)$ 为截面形心的竖向位移。

由式(3)可得截面弹性正应变 ϵ 和剪应变 γ 分别为

$$\epsilon = \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial x} = -zw''(x) + h(y, z)U'(x) + g(y, z)S'(x) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial y} = \frac{\partial h(y, z)}{\partial y}U(x) + \frac{\partial g(y, z)}{\partial y}S(x) \quad (5)$$

由于 $g(y, z)$ 为常量, 所以 $\frac{\partial g(y, z)}{\partial y} = 0$, 可得

$$\gamma = \frac{\partial h(y, z)}{\partial y}U(x) \quad (6)$$

则组合梁梁体的应变能 \bar{V}_b 为

$$\bar{V}_b = \frac{1}{2} \int_0^l \int_{A_c} (E_c \epsilon^2 + G_c \gamma^2) dA dx + \frac{1}{2} \int_0^l \int_{A_s} (E_s \epsilon^2 + G_s \gamma^2) dA dx \quad (7)$$

式中: G_c, G_s 分别为混凝土与钢材的剪切模量; l 为组合梁计算跨径; A 为截面面积。

将式(4), (6)代入式(7), 可得

$$\bar{V}_b = \frac{1}{2} E_s \int_0^l [I_y w''^2(x) + I_m U'^2(x) + I_s S'^2(x) - 2I_{tp} w''(x)U'(x) - 2I_{sp} w''(x)S'(x) + 2I_{ts} U'(x)S'(x) + \frac{G_s}{E_s} A_t U^2(x)] dx \quad (8)$$

其中

$$I_y = \frac{1}{n} \int_{A_c} z^2 dA + \int_{A_s} z^2 dA$$

$$I_m = \frac{1}{n} \int_{A_c} h^2(y, z) dA + \int_{A_s} h^2(y, z) dA$$

$$I_s = \frac{1}{n} \int_{A_c} g^2(y, z) dA + \int_{A_s} g^2(y, z) dA$$

$$I_{tp} = \frac{1}{n} \int_{A_c} zh(y, z) dA + \int_{A_s} zh(y, z) dA$$

$$I_{sp} = \frac{1}{n} \int_{A_c} zg(y, z) dA + \int_{A_s} zg(y, z) dA$$

$$I_{ts} = \frac{1}{n} \int_{A_c} h(y, z)g(y, z) dA + \int_{A_s} h(y, z)g(y, z) dA$$

$$A_t = \frac{1}{n} \int_{A_c} \left[\frac{\partial h(y, z)}{\partial y} \right]^2 dA + \int_{A_s} \left[\frac{\partial h(y, z)}{\partial y} \right]^2 dA$$

结构还应考虑相对滑移所产生的应变能 \bar{V}_s

$$\bar{V}_s = \frac{1}{2} \int_0^l k_s S^2(x) dx \quad (9)$$

式中: k_s 为单位长度上抗剪连接件的剪切滑移刚度, 是一个纯物理参数, 与交界面剪力键设置方式、类型、数量等因素有关。

外荷载势能 \bar{W} 为

$$\bar{W} = \int_0^l M(x)w'(x) dx \quad (10)$$

式中: $M(x)$ 为组合梁截面承受的弯矩。

组合梁的总势能 Π 为

$$\Pi = \bar{V}_b + \bar{V}_s + \bar{W} \quad (11)$$

根据最小势能原理, 在外力作用下, 处于平衡状态的弹性体, 总存在一组位移, 能使结构整个系统总势能最小, 并满足所有边界条件, 即体系总势能一阶变分为 0, 可得

$$\delta \Pi = \int_0^l \{ [E_s I_y w''(x) - E_s I_{tp} U'(x) - E_s I_{sp} S'(x) + M(x)] \delta w'(x) + [E_s I_m U'(x) - E_s I_{tp} w''(x) + E_s I_{ts} S'(x)] \delta U'(x) + [E_s I_s S'(x) - E_s I_{sp} w''(x) + E_s I_{ts} U'(x)] \delta S'(x) + G_s A_t U(x) \delta U(x) + k_s S(x) \delta S(x) \} dx = 0 \quad (12)$$

对方程(12)进行分部积分, 可得如下方程

$$E_s I_y w''(x) - E_s I_{tp} U'(x) - E_s I_{sp} S'(x) +$$

$$M(x)=0 \quad (13)$$

$$E_s I_m U''(x) - E_s I_{tp} w''(x) + E_s I_{ts} S''(x) - G_s A_t U(x) = 0 \quad (14)$$

$$E_s I_s S''(x) - E_s I_{sp} w''(x) + E_s I_{ts} U''(x) - k_s S(x) = 0 \quad (15)$$

$$[E_s I_m U'(x) - E_s I_{tp} w'(x) + E_s I_{ts} S'(x)] \delta U(x) \Big|_0^l = 0 \quad (16)$$

$$[E_s I_s S'(x) - E_s I_{sp} w'(x) + E_s I_{ts} U'(x)] \delta S(x) \Big|_0^l = 0 \quad (17)$$

对式(13)进行一阶求导,代入式(14),(15),消去 $w''(x)$,可得

$$(I_m I_y - I_{tp}^2) U''(x) + (I_{ts} I_y - I_{tp} I_{sp}) S''(x) + \frac{I_{tp} Q(x)}{E_s} - \frac{G_s A_t I_y U(x)}{E_s} = 0 \quad (18)$$

$$(I_s I_y - I_{sp}^2) S''(x) + (I_{ts} I_y - I_{tp} I_{sp}) U''(x) + \frac{I_{sp} Q(x)}{E_s} - \frac{k_s I_y S(x)}{E_s} = 0 \quad (19)$$

式中: $Q(x)$ 为组合梁截面承受的剪力。

由式(18),(19)可知,组合梁相对滑移与剪力滞效应相互耦合,二者互为影响。对式(18),(19)的解析求解是十分困难的,可采用数值方法进行。

然而,钢-混凝土组合梁的特点是翼板较薄,剪切变形较小,主要的剪切变形集中在钢梁腹板上,剪切应变能占系统总势能的比重较小,因此,若忽略此部分,则对计算结果产生的影响有限。因此,式(18)可演变为

$$(I_m I_y - I_{tp}^2) U''(x) + (I_{ts} I_y - I_{tp} I_{sp}) S''(x) + \frac{I_{tp} Q(x)}{E_s} = 0 \quad (20)$$

结合式(19)可得

$$S''(x) - r^2 S(x) = \frac{\alpha}{E_s} Q(x) \quad (21)$$

式中: $r^2 = \frac{k_s I_y}{E_s} (I_m I_y - I_{tp}^2) [(I_m I_y - I_{tp}^2) (I_s I_y - I_{sp}^2) - (I_s I_y - I_{tp} I_{ts})^2]^{-1}$; $\alpha = -[(I_s I_y - I_{sp}^2) I_{tp} - (I_m I_y - I_{tp}^2) I_{sp}] [(I_m I_y - I_{tp}^2) (I_s I_y - I_{sp}^2)]^{-1}$ 。

由此求得式(21)的解为

$$S(x) = \frac{\alpha}{E_s} [C_1 \sinh(rx) + C_2 \cosh(rx) + s^*] \quad (22)$$

式中: s^* 为满足边界条件的特解; C_1, C_2 均为系数。

结合式(1),(22)可以求得组合梁的滑移量。 I_{tp} 可理解为翘曲截面惯性矩,是由剪力滞效应引起的参数,由此可知,剪力滞效应会影响到组合梁滑移量的计算。

结合式(20),(22)可求得 $U(x)$ 的解析表达式

(具体视 s^* 形式所定)。

1.3 挠度和剪力滞的求解

由式(13)可得

$$\left. \begin{aligned} w''(x) &= -\frac{1}{E_s I_y} [M(x) + M_F(x) + M_s(x)] \\ M_F(x) &= -E_s I_{tp} U'(x) \\ M_s(x) &= -E_s I_{sp} S'(x) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

由此可见,简支钢-混凝土组合梁附加弯矩由2个部分组成,即相对滑移效应和剪力滞效应引起的附加弯矩,且这2个部分都会使梁的刚度减小而变形增大。附加弯矩与相对滑移量及最大转角位移差无关,而与相对滑移趋势及相对转动趋势成正比。

根据胡克定理,截面上任意一点的应力可以由式(3),(23)求得。

混凝土翼板截面内的应力 $\sigma_c(x, y, z)$ 为

$$\sigma_c(x, y, z) = E_c \epsilon_c = \frac{1}{n} E_s \epsilon_s = \frac{ZM(x)}{n I_y} + [h(y, z) - \frac{Z I_{tp}}{I_y}] \frac{E_s U'(x)}{n} + [g(y, z) - \frac{Z I_{sp}}{I_y}] \frac{E_s S'(x)}{n} \quad (24)$$

式中: ϵ_c 为混凝土应变; ϵ_s 为钢梁应变。

同理可得钢梁截面内的应力 $\sigma_s(x, y, z)$ 为

$$\sigma_s(x, y, z) = E_s \epsilon_s = \frac{ZM(x)}{I_y} + [h(y, z) - \frac{Z I_{tp}}{I_y}] \cdot E_s U'(x) + [g(y, z) - \frac{Z I_{sp}}{I_y}] E_s S'(x) \quad (25)$$

式中: Z 为计算点 z 轴方向上的坐标。

根据初等梁理论,可得到组合梁截面各部分应力分别为:

混凝土翼板应力 σ_{0c} 为

$$\sigma_{0c} = \frac{ZM(x)}{n I_y} \quad (26)$$

钢梁截面应力 σ_{0s} 为

$$\sigma_{0s} = \frac{ZM(x)}{I_y} \quad (27)$$

则剪力滞系数 λ_c, λ_s 的表达式为

$$\lambda_c = \lambda_s = 1 + \left[\frac{h(y, z)}{Z} - \frac{I_{tp}}{I_y} \right] \frac{E_s U'(x) I_y}{M(x)} + \left[\frac{g(y, z)}{Z} - \frac{I_{sp}}{I_y} \right] \frac{E_s S'(x) I_y}{M(x)} \quad (28)$$

由式(28)可知,剪力滞系数不仅与梁的横向剪切翘曲函数有关,而且还与相对滑移趋势及相对转动趋势成正比,这再次体现了二者之间的相互耦合效应。

2 特定荷载形式下的函数求解

图3中给出了某一跨径为 l 的简支钢-混凝土

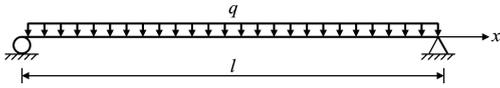


图3 组合梁受均布荷载

Fig. 3 Composite Beam with Distributed Loads

组合梁,作用均布荷载 q ,则可求得任意截面的弯矩

$$M(x) = \frac{qx}{2}(l-x), \text{ 截面剪力 } Q(x) = \frac{q}{2}(l-2x).$$

2.1 滑移函数的求解

将 $M(x), Q(x)$ 代入式(21),可得到方程的解为

$$S(x) = \frac{\alpha q}{E_s} [C_1 \sinh(rx) + C_2 \cosh(rx) - \frac{l-2x}{2r^2}] \quad (29)$$

由边界条件 $S'(0) = S'(l) = 0$ 可得系数 $C_1 =$

$$-\frac{1}{r^3}, C_2 = \frac{1}{r^3} \tanh\left(\frac{rl}{2}\right), \text{ 则广义相对滑移量为}$$

$$S(x) = \frac{\alpha q}{E_s r^2} \left[-\frac{1}{r} \sinh(rx) + \frac{1}{r} \tanh\left(\frac{rl}{2}\right) \cdot \cosh(rx) - \frac{l-2x}{2} \right] \quad (30)$$

2.2 翘曲函数的求解

结合式(20),(30)可得剪力滞广义翘曲位移

$$U(x) = \frac{B\alpha q}{E_s A} [C_3 \sinh(rx) + C_4 \cosh(rx) - \frac{I_{tp}(l-2x)^3}{48\alpha B}] \quad (31)$$

式中: $A' = I_m I_y - I_{tp}^2$; $B = I_{ts} I_y - I_{tp} I_{sp}$ 。

由边界条件 $U'(0) = U'(l) = 0$ 可得系数 $C_3 =$

$$-\frac{I_{tp} l^2}{6\alpha B}, C_4 = 0, \text{ 将其代入式(31),可得}$$

$$U(x) = \frac{q I_{tp}}{6 E_s A} \left[-\frac{l^2}{r} \sinh(rx) - \frac{(l-2x)^3}{8} \right] \quad (32)$$

2.3 剪力滞系数的求解

将式(31),(32)代入式(28),可得均布荷载作用

下简支钢-混凝土组合梁剪力滞系数 λ 为

$$\lambda = 1 + \frac{(l-x) I_y I_{tp}}{3 A x} \left[\frac{h(y,z)}{Z} - \frac{I_{tp}}{I_y} \right] \left[l^2 \cosh(rx) + \frac{3(l-2x)^2}{4} \right] + \frac{2 I_y (l-x)}{r^2 x} \left[\frac{g(y,z)}{Z} - \frac{I_{sp}}{I_y} \right] \cdot \left[-\cosh(rx) + \tanh\left(\frac{rl}{2}\right) \sinh(rx) + 1 \right] \quad (33)$$

2.4 挠度的求解

剪力滞效应引起的附加弯矩 M_F 为

$$M_F = -E_s I_{tp} U'(x) = \frac{q I_{tp}^2}{6 A} \left[l^2 \cosh(rx) - \frac{3}{4} (l-2x)^2 \right] \quad (34)$$

相对滑移效应引起的附加弯矩 M_s 为

$$M_s = -E_s I_{sp} S'(x) = \frac{I_{sp} \alpha q}{r^2} \left[\cosh(rx) - \tanh\left(\frac{rl}{2}\right) \sinh(rx) - 1 \right] \quad (35)$$

梁的曲率表达式为

$$w''(x) = -\frac{q}{E_s I_y} \left\{ \frac{x(l-x)}{2} + \frac{I_{tp}^2}{6 A} \left[l^2 \cosh(rx) - \frac{3}{4} (l-2x)^2 \right] + \frac{I_{sp} \alpha}{r^2} \left[\cosh(rx) - \tanh\left(\frac{rl}{2}\right) \sinh(rx) - 1 \right] \right\} \quad (36)$$

对式(36)进行积分,可得

$$w(x) = -\frac{q}{E_s I_y} \left\{ \frac{x^3(4l-x)}{48} + \frac{I_{tp}^2}{6 A} \left[\frac{l^2}{r^2} \cosh(rx) - \frac{1}{48} (l-2x)^4 \right] + \frac{I_{sp} \alpha}{r^2} \left[\frac{1}{r^2} \cosh(rx) - \frac{1}{r^2} \tanh\left(\frac{rl}{2}\right) \cdot \sinh(rx) - \frac{x^2}{2} \right] \right\} + C_5 x + C_6 \quad (37)$$

式中: C_5, C_6 均为系数。

对于简支钢-混凝土组合梁,其边界条件为 $w(0) = w'(l/2) = 0$,将其代入式(37),可得系数 C_5, C_6 分别为

$$C_5 = -\frac{5l^3}{96} - \frac{I_{tp}^2 l^2}{6 A r} \sinh(rl) - \frac{I_{sp} \alpha}{r^2} \left[\frac{1}{r} \cosh(rl) - \frac{1}{r} \tanh\left(\frac{rl}{2}\right) \sinh(rl) - \frac{l}{2} \right] \quad (38)$$

$$C_6 = -\frac{I_{tp}^2 l^2 (48 - r^2 l^2)}{288 A r^2} - \frac{I_{sp} \alpha}{r^4} \quad (39)$$

3 算例分析

某计算跨径为 12 m 的简支钢-混凝土组合梁,其截面尺寸如图 4 所示。

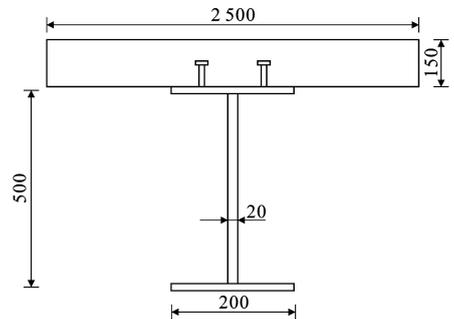


图4 组合梁截面尺寸(单位:mm)

Fig. 4 Section Dimensions of Composite Beam (Unit:mm)

钢材和混凝土材料参数为:C50混凝土, $E_c = 34.5$ GPa,强度设计值 $f_{cd} = 22.4$ MPa;Q235钢材, $E_s = 206$ GPa,交界面上纵向剪切滑移刚度分别取

$k_s = k_1 = 94 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $k_s = k_2 = 47 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, 均布荷载 $q = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。分别按单独考虑滑移、剪力滞效应和综合考虑二者之间的耦合效应对该算例进行计算, 并与有限元计算结果进行比较。组合梁有限元模型如图 5 所示。



图 5 组合梁有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model of Composite Beam

3.1 挠度计算结果

挠度计算结果如图 6 所示。从图 6 可知: ①滑移效应和剪力滞效应对组合梁的刚度有较大影响。仅考虑剪力滞效应时, 计算最大挠度比初等梁理论计算结果大 17.6%, 当综合考虑这 2 种效应时, 计算所得最大挠度增大 41.5%, 可见, 二者耦合效应对组合梁的刚度有较大影响; ②抗剪滑移刚度对组合梁挠度有显著影响, 当抗剪刚度减少 50% 时, 结构的刚度降低约 14.3%; ③综合考虑滑移和剪力滞耦合效应的计算结果与有限元法计算结果相吻合, 二者计算的最大挠度相差 5.2%。

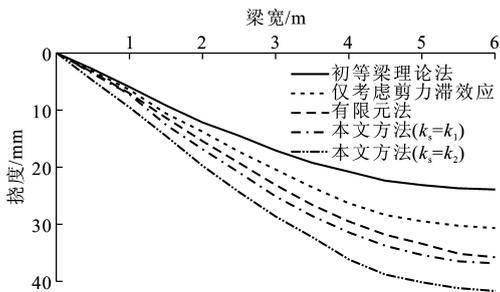


图 6 挠度计算结果

Fig. 6 Deflection Calculation Results

3.2 相对滑移

相对滑移计算结果如图 7 所示。由图 7 可知: ①本文方法所得相对滑移量最大值较有限元法计算结果偏大, 最大相差约 27% ($k_s = k_1$) 和 22% ($k_s = k_2$), 但最大值出现的位置有差异。有限元计算结果显示, 最大滑移出现在距组合梁端部附近约 1/5 跨处, 而本文方法所得最大滑移出现在梁端部; ②抗滑移刚度对相对滑移量有较大影响, 当刚度减少一半时, 最大滑移量增加约 84%, 但对滑移的分布规律无影响, 仍然是端部最大向跨中迅速递减至 0。

3.3 应力计算

跨中截面应力计算结果如图 8, 9 所示。计算结果表明: ①剪力滞效应在这种有纵肋的组合梁上亦

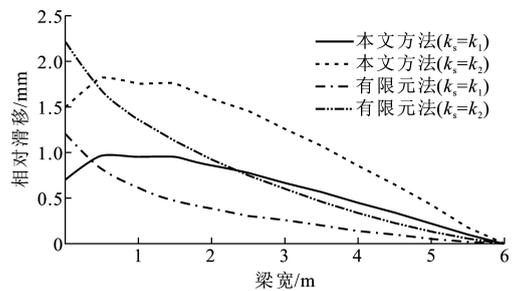


图 7 相对滑移计算结果

Fig. 7 Calculation Results of Relative Slip

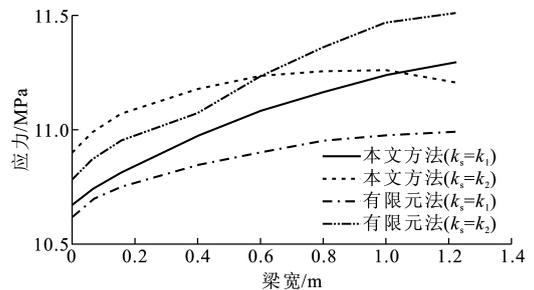


图 8 $Z=250 \text{ mm}$ 时的混凝土板截面应力计算结果

Fig. 8 Calculation Results of Concrete Slab Section

Stress When $Z=250 \text{ mm}$

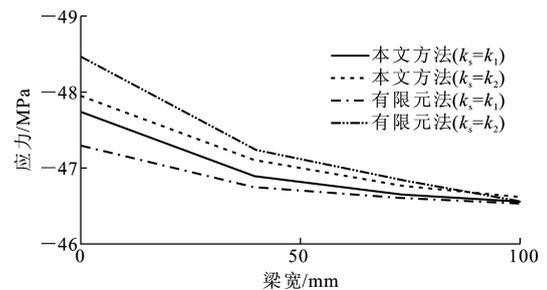


图 9 $Z=-238 \text{ mm}$ 时的钢梁截面应力计算结果

Fig. 9 Calculation Results of Steel Beam Section

Stress When $Z=-238 \text{ mm}$

有体现, 但却与普通剪力滞效应有所不同, 对于混凝土顶板, 出现了靠近纵肋处应力小而远离纵肋处应力大的负剪力滞现象, 钢梁底板则依然是正剪力滞, 产生的原因是由于相对滑移产生了与肋板引起的翘曲剪力滞相反的应力, 从而削弱了肋板的剪切翘曲影响, 致使在顶板出现了负剪力滞而底板则出现正剪力滞; ②抗剪连接对应力大小有影响, 但对应力分布情况无显著影响; ③相对滑移会削弱混凝土顶板的剪力滞, 整个截面应力分布相对均匀。

4 结语

(1) 钢-混凝土组合梁同时存在剪力滞与滑移效应, 且二者相互耦合, 相互影响。单独考虑某一方面的影响或孤立地分析二者效应是不全面的。

(2)剪力滞和滑移效应都会引起组合梁附加弯矩、降低刚度。附加弯矩和相对滑移量都与最大转角位移差无关,而与相对滑移趋势以及相对转动趋势成正比。

(3)界面相对滑移不仅与相对滑移位函数、钢材材料特性以及截面几何性质有关,还会受到剪切翘曲截面惯性矩的影响。相对滑移量最大值出现在组合梁端部附近,因此很有必要在组合梁端部加强剪力键的设置。

(4)剪力滞系数不仅与梁的横向剪切翘曲函数有关,而且还与相对滑移趋势以及相对转动趋势成正比。但与相对滑移量和最大转角位移差无关,相对滑移的存在有可能会改变截面应力状态,这个特性有待继续研究。

参考文献:

References:

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
NIE Jian-guo. Steel-concrete Composite Structure Bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [2] 蔺鹏臻. 混凝土箱梁剪力滞效应的分析理论与应用研究[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
LIN Peng-zhen. Research on Analysis Theory & Application of Shear Lag Effect for Concrete Box Girders [M]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [3] 耿少波,石雪飞,阮欣,等. 增设广义位移下箱梁剪力滞效应的变分法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2010,38(9):1276-1280.
GENG Shao-bo, SHI Xue-fei, RUAN Xin, et al. Variational Method of Shear Lag Effect of Box Beams with Adding Generalized Displacement Assumptions [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(9):1276-1280.
- [4] 张元海,张清华,李乔. 宽翼缘薄壁梁剪力滞效应分析的变分解法[J]. 工程力学,2006,23(1):52-56.
ZHANG Yuan-hai, ZHANG Qing-hua, LI Qiao. A Variational Approach to the Analysis of Shear Lag Effect of Thin-walled Beams with Wide Flange[J]. Engineering Mechanics, 2006,23(1):52-56.
- [5] SUN F F, BURSI O S. Displacement-based and Two-field Mixed Variational Formulations for Composite Beams with Shear Lag[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005,131(2):199-210.
- [6] OKUI Y, NAGAI M. Block FEM for Time-dependent Shear-lag Behavior in Two I-girder Composite Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2007,12(1):72-79.
- [7] CHIEWANICHAKORN M, AREF A J, CHEN S S, et al. Effective Flange Width Definition for Steel-concrete Composite Bridge Girder[J]. Journal of Structural Engineering, 2004,130(12):2016-2031
- [8] KWON G, ENGELHARDT M D, KLINGNER R E. Experimental Behavior of Bridge Beams Retrofitted with Postinstalled Shear Connectors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011,16(4):536-545.
- [9] LIANG Q Q, UY B, 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.
- [10] XU R Q, CHEN D Q. Variational Principles of Partial-interaction Composite Beams[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012,138(5):542-551.
- [11] 蒋丽忠,余志武,李 佳. 均布荷载作用下钢-混凝土组合梁滑移及变形的理论计算[J]. 工程力学, 2003, 20(2):133-137.
JIANG Li-zhong, YU Zhi-wu, LI Jia. The Oretical Analysis of Slip and Deformation of Steel-concrete Composite Beam Under Uniformly Distributed Loads [J]. Engineering Mechanics, 2003,20(2):133-137.
- [12] 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.
- [13] 孙飞飞,李国强. 考虑滑移、剪力滞和后和剪切变形的钢-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.
- [14] 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 of Composite Steel-concrete Beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1997,30(1):31-36.
- [15] FORABOSCHI P. Analytical Solution of Two-layer Beam Taking into Account Nonlinear Interlayer Slip [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(10):1129-1146.