

均布荷载作用下钢-混凝土组合梁界面滑移 近似计算及其效应分析

孟石平 蒋秀根 剧锦三

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 为了计算钢-混凝土组合梁的截面滑移及其对梁强度和刚度的影响,提出了具有界面滑移的钢-混凝土组合梁的总荷载及截面总弯矩由 2 部份组成,不考虑滑移的组合梁承担整体荷载及整体弯矩,能自由滑移的叠合梁承担局部荷载和局部弯矩。基于 Bernoulli 梁理论和抗剪连接件线性剪力-滑移模型,建立截面总弯矩分配的计算公式,给出均布荷载作用下简支组合梁的栓钉剪力及界面滑移近似计算公式,得到了考虑滑移的组合梁在弹性阶段截面弹性应力、跨中挠度的计算公式及挠度增大系数。

关键词 钢-混凝土组合梁;滑移;整体弯矩;局部弯矩;弹性

中图分类号 TU 398

文章编号 1007-4333(2007)01-0085-05

文献标识码 A

Approximate method for analysis of interface slip and its effect on steel-concrete composite beams under uniform distribution loads

Meng Shiping, Jiang Xiugen, Ju Jinsan

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract A method for analyzing the performance of steel-concrete composite beams with interface slip was developed in this paper. In the model an assumption was made that the total moment of a composite beam with interface slip was consisted of a global moment that was borne by a composite beam without interface slip and a local moment that was borne by a superposition beam with freely interface slip only. Then, a formula for moment allocation of a beam was developed based on Bernoulli beam theory and shear-slip model of shear connector. The formulas of interface slip and shear force of shear connector, stress in the cross-section and the deflection of beam in elasticity state were given for simply-supported beams under uniform distribution loads.

Key words steel-concrete composite beam; slip; global moment; local moment; elasticity

钢-混凝土组合梁是由钢梁与混凝土翼缘板组成,通过设置在交界面上的抗剪连接件保证钢梁与混凝土板整体共同受弯的一种结构。由于充分利用了混凝土的抗压性能和钢梁的抗拉性能,有效防止了钢梁的整体失稳和受压翼缘的局部屈曲,钢-混凝土组合梁具有较同样截面钢梁或混凝土梁更高的刚度和承载力,被广泛应用于重荷载、大跨度的高层建筑、大跨结构及桥梁结构之中^[1-5]。

组合梁与不设置抗剪连接件的钢-混凝土迭合梁的区别在于,其较好地解决了钢梁和混凝土板之

间的剪切滑移,从而保证了梁截面的协调变形、整体受弯;然而,出于施工方便和经济的原因,界面抗剪连接件的设置要么存在部分连接,要么使用柔性连接件(如广泛使用的栓钉),使得钢梁与混凝土板界面之间存在或多或少的剪切滑移。界面剪切滑移的存在降低了组合梁的整体工作性能,使得梁的承载力和刚度都出现了程度不等的降低。准确地预测界面滑移的大小对于计算组合梁的实际承载力和变形对于保证组合梁的安全性和适用性具有十分重要的意义^[1]。

收稿日期:2006-05-31

作者简介:孟石平,硕士研究生;蒋秀根,教授,通讯作者,主要从事结构工程方面的研究,E-mail:jiangxg@cau.edu.cn

国内外很多学者对钢-混凝土组合梁界面滑移及其效应进行了大量的理论和实验研究^[2-3,6-8],其中Johnson提出的“部分-交互作用理论(Partial-interaction theory)”^[3]被国内很多学者用于简支组合梁的界面滑移和刚度、承载力计算,研究成果被我国《规范》^[9]所采用。笔者在整体组合梁和迭合梁受弯原理的基础上,提出了“整体-局部弯曲模型”计算组合梁截面抗弯强度的分析方法,在界面滑移已知的条件下计算得到的截面抗弯强度较基于“部分-交互作用理论”具有更高的精度^[10]。

本文中拟采用“整体-局部弯曲模型”建立钢-混凝土组合梁的界面滑移计算方法,进一步完善“整体-局部弯曲模型”的内涵。

1 基本假定及参数定义

1.1 基本假定

基于Bernoulli梁的工作原理,研究采用了以下基本假定:

- 1) 在正常荷载工作阶段钢材和混凝土均为线性弹性材料。
- 2) 不考虑掀起效应,混凝土翼缘板和钢梁的弯曲曲率相等。
- 3) 为计算简便,对截面按等效刚度法进行换算。
- 4) 抗失稳构造措施保证钢梁不发生整体失稳和局部屈曲。
- 5) 为了说明本文中的滑移计算方法,只考虑钢梁和混凝土翼缘板之间的抗滑移连接件为工程中最常见的栓钉,其水平剪力与相对滑移成线性关系, $p_v = K_s^{[7,9,10]}$ 。式中: p 为抗剪连接件间距; v 为栓钉剪力; K 为抗剪连接件刚度; s 为界面相对滑移。

6) 截面总弯矩 M_T 由2部分组成:整体弯矩 M_G 作用于组合梁,不产生截面滑移;局部弯矩 M_L 作用于叠合梁,由 M_{Lc} 和 M_{Ls} 组成,分别由混凝土翼缘板和钢梁承担(下标 c 和 s 分别表示混凝土翼缘板和钢梁,下同),在截面产生滑移应变。

1.2 截面参数定义

- 1) 钢梁:截面面积 A_s ,截面高度 h_s ,上翼缘宽度 b_{sf} ,截面形心自下边缘高度 y_{s0} ,截面惯性矩 I_s 。
- 2) 混凝土翼板:换算截面面积 $A_c = b_c h_c / E_c$;换算截面宽度 $b_c = b_c / E_c$, $E_c = E_s / E_c$,其中 E_s 和 E_c 分别为钢材和混凝土弹性模量;截面高度 h_c ;换算截面惯性矩 $I_c = 1/12(b_c h_c^3 / E_c)$ 。

3) 组合截面:组合梁高度 $h = h_s + h_c$;形心距下边缘高度 $y_0 = [A_s y_{s0} + A_c (h_s + 0.5 h_c)] / (A_s + A_c)$;钢梁与混凝土翼缘的形心距 $d_c = h - 0.5 h_c - y_{s0}$;面积距 $S_0 = A_c (h - 0.5 h_c)$;组合梁惯性矩 $I = I_0 + A_c (h - 0.5 h_c - y_0)^2 + A_s (y_0 - y_{s0})^2$,其中 $I_0 = I_s + I_c$ 。

2 均布荷载作用下的简支梁界面滑移分析

2.1 简支梁内力分析

为了分析方便,建立坐标系(图1)。弯矩 $M(x) = \frac{1}{8} q l^2 - \frac{1}{2} q x^2$,剪力 $V(x) = q x$ 。式中: q 为均布荷载, l 为简支梁跨度。

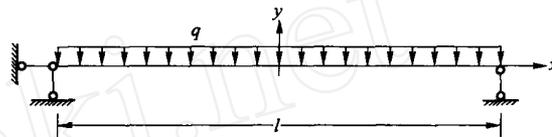


图1 简支组合梁计算简图

Fig. 1 Simplified model of simply-supported beam

2.2 整体弯矩性能分析

1) 荷载与内力。整体弯矩 $M_G(x)$ 由无滑移组合梁承担,假设无滑移组合梁承担的均布荷载为 q_G ,截面弯矩 $M_G(x)$ 和截面剪力 $V_G(x)$ 分别为

$$M_G(x) = \frac{1}{8} q_G l^2 - \frac{1}{2} q_G x^2 \quad (1)$$

$$V_G(x) = q_G x \quad (2)$$

2) 界面剪应力。根据剪应力互等定理,界面剪应力

$$\tau_0(x) = \frac{V_G(x) S_0}{I b_{st}} = \frac{q_G S_0}{I b_{st}} x \quad (3)$$

3) 栓钉剪力。距离跨中 x 处的栓钉剪力 $V_{0,x}$ 可通过沿界面长度的剪应力积分求得

$$V_{0,x} = \int_{n_s}^{x+p/2} \tau_0(x) dx = \int_{n_s}^{x+p/2} \frac{b_{sf}}{n_s} \frac{q_G S_0}{I b_{st}} x dx = \frac{S_0 p}{I n_s} q_G x \quad (4)$$

式(4)可简化为

$$V_{0,x} = A q_G x \quad (5)$$

其中 $A = S_0 p / (I n_s)$, n_s 为栓钉连接件在1根梁同一截面上的列数。

2.3 局部弯矩性能分析

1) 荷载与内力。局部弯矩由界面自由滑移的叠合梁承担,假设叠合梁承担的均布荷载为 q_L ,截面

弯矩

$$M_L(x) = \frac{1}{8} q_L l^2 - \frac{1}{2} q_L x^2 \quad (6)$$

2) 弯矩分配。依据组合梁无掀起效应, 即弯曲曲率相等的条件, 可以得到混凝土翼板承担的局部弯矩 M_{Lc} 和钢梁承担的局部弯矩 M_{Ls} , 分别为

$$M_{Lc} = (I_c / I_0) M_L \quad (7)$$

$$M_{Ls} = (I_s / I_0) M_L \quad (8)$$

3) 界面应变。局部弯矩作用下界面混凝土板下翼缘的拉应变 ϵ_c 和钢梁上翼缘的压应变 ϵ_s 分别为

$$\epsilon_c = \frac{M_{Lc}}{E_s I_c} \frac{1}{2} h_c \quad (9)$$

$$\epsilon_s = \frac{M_{Ls}}{E_s I_s} (h_s - y_{s0}) \quad (10)$$

4) 滑移应变。界面上一点的滑移应变 δ_{slip} 为混凝土拉应变和钢材压应变的和, 由式(6)~(10)得

$$\delta_{slip} = \epsilon_c + \epsilon_s = \frac{M_L d_c}{E_s I_0} = \frac{d_c q_L}{E_s I_0} \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{2} x^2 \right]$$

令 $d = d_c / (E_s I_0)$, 则

$$\delta_{slip} = q_L \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{2} x^2 \right] \quad (11)$$

5) 滑移变形。根据对称性原则, 跨中点的界面滑移为 0, 距离跨中 x 处的界面滑移可由式(11)通过积分求得

$$s(x) = \int_0^x \delta_{slip} dx = q_L \int_0^x \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{2} x^2 \right] dx = q_L \left[\frac{1}{8} l^2 x - \frac{1}{6} x^3 \right] \quad (12)$$

2.4 整体弯矩与局部弯矩的分配

1) 建立剪力与滑移的关系。依据基本假定 5), 将式(5)和(12)代入 $v = Ks$, 得

$$A q_G x = K q_L \left[\frac{1}{8} l^2 x - \frac{1}{6} x^3 \right] \quad (13)$$

由式(13)得

$$\frac{q_G}{q_L} = \frac{K}{A} \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] \quad (14)$$

依据基本假定 6) 得

$$q_G + q_L = q \quad (15)$$

令 $C = K / A$, 则由式(14)和(15)求得

$$q_G = q \left[\frac{C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right]}{C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] + 1} \right] \quad (16)$$

$$q_L = q \left[\frac{1}{C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] + 1} \right] \quad (17)$$

2) 整体弯矩。由式(1)和(16)求得整体弯矩

$$M_G = \left[\frac{C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right]}{C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] + 1} \right] \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{2} x^2 \right] q = (R/Z) M(x) = G M(x) \quad (18)$$

式中: $R = C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right]$, $Z = C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] + 1$, $G = R/Z$ 为整体弯矩分配系数。

3) 局部弯矩。由式(6)和(16)求得局部弯矩

$$M_L = \left[\frac{1}{C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] + 1} \right] \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{2} x^2 \right] q = (1/Z) M(x) = L M(x) \quad (19)$$

其中 $L = 1/Z$ 为局部弯矩分配系数。

4) 局部弯矩在钢梁和混凝土翼缘板上的分配。局部弯矩由叠合梁承担, 依据叠合梁原理, 局部弯矩的分配按钢梁和混凝土翼板的刚度分配求得, 钢梁弯矩 M_{Ls} 和混凝土翼板弯矩 M_{Lc} 分别为

$$M_{Ls} = (I_s / I_0) M_L = (I_s / I_0) L M(x) = s_L M(x) \quad (20)$$

$$M_{Lc} = (I_c / I_0) M_L = (I_c / I_0) L M(x) = c_L M(x) \quad (21)$$

式中: $c_L = I_c / I_0$, $s_L = I_s / I_0$ 。

5) 栓钉剪力。将式(16)代入(5), 再依据式(18), 得

$$V_{0,x} = A_G q x \quad (22)$$

6) 界面滑移量。将式(17)代入(12), 再依据式(19), 得

$$s(x) = D_L q \left[\frac{1}{8} l^2 x - \frac{1}{6} x^3 \right] \\ s(x) = D_L q \left[\frac{1}{8} l^2 x - \frac{1}{6} x^3 \right] = (Dq) / \left[C \left[\frac{1}{8} l^2 - \frac{1}{6} x^2 \right] + 1 \right] \left[\frac{1}{8} l^2 x - \frac{1}{6} x^3 \right] \quad (23)$$

3 组合梁截面弹性应力和变形分析

3.1 截面弹性应力

1) 混凝土翼板顶面的弹性应力。

依据基本假定 6) 和叠加原理知, 混凝土翼板顶面弯曲正应力 σ_c 为整体弯矩作用下组合梁的正应力 σ_G 和局部弯矩作用下叠合梁的正应力 σ_{Lc} 之和, 即

$$\sigma_c = \sigma_G + \sigma_{Lc} \quad (24)$$

由弹性分析理论可求得

$$c = \frac{M_G}{a_E I} (h - y_0) + \frac{M_{Lc} h_c}{I_c} \quad (25)$$

将式(18)和(21)代入(25),得

$$c = \frac{G M(x)}{a_E I} (h - y_0) + \frac{c_L M(x) h_c}{I_c} \quad (26)$$

将式(26)简化为

$$c = G M(x) + L M(x) \quad (27)$$

式中: $G = \frac{1}{a_E I} (h - y_0)$, $L = \frac{1}{I_c} \frac{h_c}{2} c_0$

2) 钢梁下翼缘弹性应力。依据基本假定 6) 和叠加原理知, 钢梁应力 σ_s 为整体弯矩作用下组合梁的法向应力 σ_{Gs} 和局部弯矩作用下叠合梁的法向应力 σ_{Ls} 之和, 即

$$\sigma_s = \sigma_{Gs} + \sigma_{Ls} \quad (28)$$

由弹性分析理论可求得

$$\sigma_s = \frac{M_G}{I} y_0 + \frac{M_{Ls}}{I_s} y_{s0} \quad (29)$$

将式(19)和(20)代入(29), 得

$$\sigma_s = \frac{1}{I} y_0 G M(x) + \frac{1}{I_s} y_{s0} L M(x) \quad (30)$$

3.2 组合梁弹性挠度

1) 局部荷载在混凝土翼板和钢梁上的分配。局部荷载由叠合梁承担, 依据叠加原理, 局部荷载的分配按钢梁和混凝土翼板的刚度分配求得, 钢梁荷载 q_{Ls} 和混凝土翼板荷载 q_{Lc} 分别为

$$q_{Ls} = s q_L \quad (31)$$

$$q_{Lc} = c q_L \quad (32)$$

2) 跨中挠度计算。依据叠加原理可以得到考虑滑移效应时钢-混凝土组合梁总挠度

$$f_T = f_G + f_L = f_G + f_{Lc} \quad (33)$$

式中: f_G 为整体弯矩作用于组合梁的挠度, f_L 为局部弯矩作用于叠合梁的挠度。将整体分布荷载(局部分布荷载)近似简化为均布荷载, 利用简支梁在均布荷载作用下跨中挠度计算公式, 并将式(16)、(17)和(32)代入(33), 可得跨中挠度

$$f_T = f \frac{5 q l^4}{384 E_s I} \quad (34)$$

式中 $f = (1 + I/I_0)/(1 + 8/CI^2)$ 为跨中挠度增大系数。

4 算例及分析

分别采用本文方法、《规范》推荐方法^[10]和聂建国提出的折减刚度法^[6]对某组合梁进行挠度计算, 组合梁参数: 钢梁 I20 a, 钢材弹性模量 206 GPa, 混凝土翼缘板宽 1 100 mm, 厚 112.58 mm, 组合梁梁高 312.58 mm, 混凝土棱柱体抗压强度 50.7 MPa, 弹性模量 39.1 GPa。分别计算栓钉间距 p 和刚度 K 不同时梁跨挠度增大系数及其变化规律。计算结果分别见图 2 和图 3。可以看出: 1) 本文中提出的

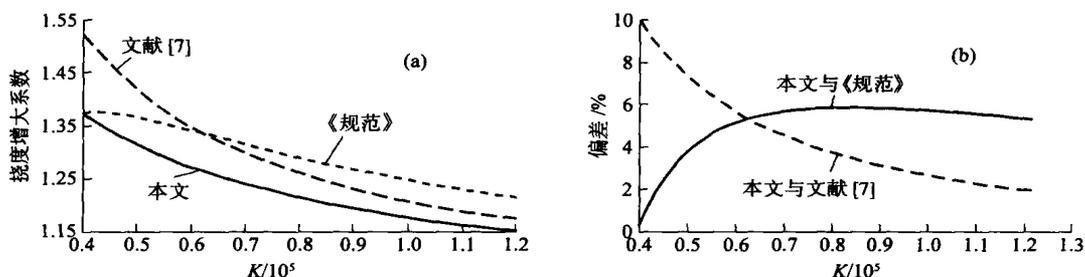


图 2 栓钉刚度不同时的梁跨中挠度增大系数: (a) 不同模型下的挠度增大系数; (b) 本文模型结果与其他模型结果的偏差

Fig. 2 Deflection amplify factor on mid-span with varied stiffness of stud connectors: (a) deflection amplify factor by different models; (b) deviation of deflection amplify factor between different models

基于整体-局部弯曲模型可以较好地分析组合梁的截面滑移及其效应, 说明本文模型合理; 2) 本文模型结果较我国《规范》推荐值^[9]低 5%~10%, 原因是为了避免复杂的积分运算, 本文中近似采用等值的弯矩分配系数直接计算梁的跨中挠度; 3) 与“部分交互作用理论”相比, 本文模型概念更为清晰, 计算公式更为简单; 4) 本文模型得到的滑移、变形计算公式

精度在土木工程的误差范围要求之内, 可以应用于实际工程设计。

5 结论

1) 钢-混凝土组合梁的界面滑移会降低梁的刚度和承载力, 工程中必须考虑滑移的影响。

2) 本文中提出“整体-局部弯曲模型”, 其原理

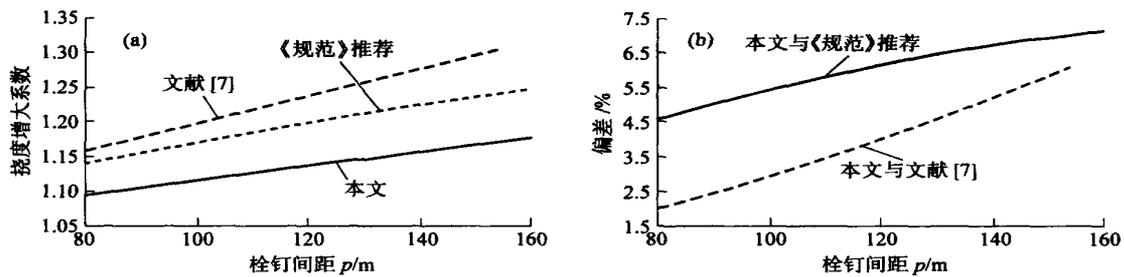


图 3 栓钉间距不同时的梁跨中挠度增大系数: (a) 不同模型下的挠度增大系数; (b) 本文模型结果与其他模型结果的偏差
Fig. 3 Deflection amplify factor on mid-span with varied spacing of stud connectors: (a) deflection amplify factor by different models; (b) deviation of deflection amplify factor between different models

是, 梁的弯曲由整体弯曲和局部弯曲组成, 无滑移组合梁产生整体弯曲, 整体弯曲产生界面剪力, 界面剪力由抗剪连接件承担; 自由滑移适合梁产生局部弯曲, 局部弯曲产生界面滑移。

3) 基于 Bernoulli 梁理论和抗剪连接件本构关系建立了均布荷载作用下简支组合梁的界面滑移、承载力及跨中挠度近似计算公式, 可以用于工程计算。

参 考 文 献

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [2] 王广连. 钢与混凝土组合结构: 理论与计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2005
- [3] Johnson R P. Composite structures of steel and concrete: Vol 1: beams, columns, frames and applications in buildings [M]. (3 ed). Oxford: Blackwell Scientific, 2004
- [4] 聂建国, 余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用 [J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8
- [5] 肖辉, 李爱群, 陈丽华, 等. 钢与混凝土组合梁的发展、研究和应用 [J]. 特种结构, 2005, 22(1): 38-41
- [6] 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
- [7] 聂建国, 沈聚敏, 袁彦声. 钢-混凝土简支组合梁变形计算的一般公式 [J]. 工程力学, 1994, 11(1): 21-27
- [8] 聂建国, 王洪全, 谭英, 等. 钢-高强混凝土组合梁的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 58-62
- [9] GB50017—2003 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003: 116-119
- [10] 蒋秀根, 剧锦三, 傅向荣. 考虑滑移效应的钢-混凝土组合梁弹性应力计算 [J]. 工程力学 (待刊)