

文章编号: 1000-0887(2005) 06-0677-06

集中荷载作用下组合梁剪切 滑移计算分析^{*}

刘寒冰, 刘文会, 张云龙

(吉林大学 交通学院, 长春 130025)

(叶志 明推 荐)

摘要: 基于弹性理论, 对钢_混凝土组合梁在竖向集中荷载作用下的剪切滑移应变差进行了理论分析, 并与均布荷载作用下公认的理论解进行了计算对比。结果表明, 所推导的在集中荷载作用下, 钢_混凝土组合梁的剪切滑移应变差的计算公式是可信的。因为实际工程多为集中荷载作用, 所以用该计算公式可以很方便的解决工程实际问题。

关 键 词: 组合梁; 集中荷载; 部分共同作用; 剪切滑移

中图分类号: O343. 1; TU311. 1; U441⁺. 5 文献标识码: A

引 言

用剪切螺栓连接的钢_混凝土组合梁在受弯过程中, 由于钢_混凝土交界面处存在着剪切滑移现象, 截面不再满足平截面假定, 因此研究截面的应变变化规律具有重要意义。迄今, 国内外已有一些学者在此方面陆续进行了卓有成效的试验及理论研究工作^[1~ 6]。文献[1] 给出了竖向集中荷载作用在简支梁跨中时的计算公式; 文献[2]、[3] 在具体应用中采用了简化的计算方法; 文献[5]、[6] 给出了基于能量方法的算法。

本文基于弹性理论, 对钢_混凝土组合梁在竖向集中荷载作用下的剪切滑移应变差的计算公式进行了理论推导, 并与均布荷载作用下公认的理论解进行了计算对比。给出了易于为工程人员所掌握的简单公式, 通过计算钢_混凝土组合梁在任意竖向集中荷载作用下的截面应变, 来分析其承载能力及位移的变化, 从而指导实际工程的设计与施工。

1 竖向集中荷载作用下组合梁的应变差计算

1. 1 截面内力计算

集中荷载作用下组合梁断面图如图 1 所示, 其截面应变关系如图 2 所示。由图 2 所示组合梁的应变关系不难得出截面内力:

^{*} 收稿日期: 2003_12_30; 修订日期: 2005_03_09
基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20020631)
作者简介: 刘寒冰(1957—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事桥梁结构设计与计算方面的研究;
刘文会(联系人, Fax: + 86_431_5935029; E_mail: bridge812@sohu. com)。

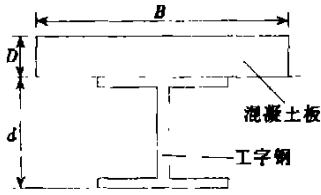


图1 组合梁断面图

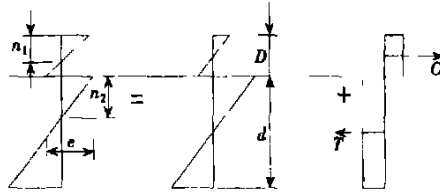


图2 截面应变图

混凝土板的轴力

$$C = kE_c A_c \left(n_1 - \frac{D}{2} \right); \quad (1)$$

钢梁的轴力

$$T = kE_s A_s \left(\frac{d}{2} - n_2 \right); \quad (2)$$

截面弯矩

$$M = k(E_c I_c + E_s I_s) + C \left(\frac{D}{2} + \frac{d}{2} \right); \quad (3)$$

应变差

$$e = k(D + n_2 - n_1); \quad (4)$$

式中, k 为截面曲率, E_c 、 A_c 分别为混凝土弹性模量、面积, E_s 、 A_s 分别钢梁的弹性模量、面积。由 $C = T$ 得:

$$E_c A_c \left(n_1 - \frac{D}{2} \right) = E_s A_s \left(\frac{d}{2} - n_2 \right). \quad (5)$$

联立求解式(1)和(5)得:

$$k = \frac{C}{E_c A_c (n_1 - D/2)}. \quad (6)$$

(4)、(5)、(6)式联立求解得:

$$n_1 - \frac{D}{2} = \frac{D + d}{2} \left(1 + \frac{E_c A_c}{E_s A_s} + e \frac{E_c A_c}{C} \right). \quad (7)$$

式(6)、(7)代入式(3)得:

$$M = \frac{2C}{E_c A_c (D + d)} \left(1 + \frac{E_c A_c}{E_s A_s} + e \frac{E_c A_c}{C} \right) (E_c I_c + E_s I_s) + C \frac{D + d}{2} = \frac{C}{2} \left(\frac{(D + d)^2 E_c A_c E_s A_s + 4(E_c I_c + E_s I_s)(E_c A_c + E_s A_s)}{(D + d) E_c A_c E_s A_s} \right) + 2e \left(\frac{E_c I_c + E_s I_s}{D + d} \right). \quad (8)$$

1.2 剪力连接件的抗剪刚度

剪力 q 和滑移间的关系为:

$$q = K \cdot S / l_a, \quad (9)$$

式中, S 为滑移量; l_a 为剪切螺栓间距; K 为螺栓剪切刚度, $K = 0.66 \times n_s \times V_u^{[2-3]}$; n_s 为栓钉沿梁纵向的列数, $V_u = 0.43 \times A_s \times \sqrt{E_c \times f_{ck}}$, f_{ck} 为圆柱体抗压强度, A_s 为栓钉截面面积, E_c 为混凝土弹性模量。

由式(9)求应变差:

$$e = \frac{dS}{dx} = \frac{l_a dq}{K dx} \quad (10)$$

钢-混凝土组合梁交界面处的受力状态如图 3 所示。

由 $q dx + dC = 0$, 有:

$$q = - \frac{dC}{dx}, \quad (11)$$

推出

$$\frac{dq}{dx} = - \frac{d^2 C}{dx^2} \quad (12)$$

将式(12)代入式(8)得:

$$\frac{M}{\alpha} = \beta^2 C - C'', \quad (13)$$

式中

$$\alpha = 2l_a \left[\frac{E_c I_c + E_s I_s}{D + d} \right] \sqrt{K},$$

$$\beta^2 = \frac{K}{4l_a(E_c I_c + E_s I_s)} \frac{(D + d)^2 E_c A_c E_s A_s + 4(E_c I_c + E_s I_s)(E_c A_c E_s A_s)}{E_c A_c E_s A_s}.$$

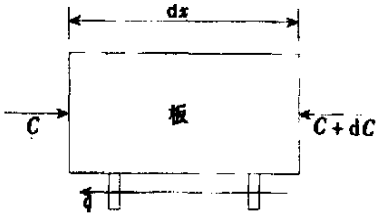


图 3 组合梁交界面微元体受力图

在竖向集中荷载作用下, (13) 式的解为:

$$C = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + \frac{M}{\beta^2 \alpha} \quad (14)$$

对于如图 4 所示的组合梁, (14) 式方程的表达式为:

当 $0 \leq x \leq a$ 时,

$$C_{\text{left}} = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + \frac{P(l-a)x}{\beta^2 \alpha l}; \quad (15)$$

当 $a < x \leq l$ 时,

$$C_{\text{right}} = C_3 e^{\beta x} + C_4 e^{-\beta x} + \frac{Pa(l-x)}{\beta^2 \alpha l} \quad (16)$$

集中荷载作用下的钢-混凝土组合梁的边界条件为:

$$x = 0, C = 0; \quad x = l, C = 0; \quad x = a, C_{\text{left}} = C_{\text{right}}; \quad x = a, C'_{\text{left}} = C'_{\text{right}},$$

代入边界条件后可求得方程(15)、(16)的待定系数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ,

$$C_1 = - \frac{m_2 m_5}{m_2 m_3 + m_1 m_4}, \quad C_2 = \frac{m_2 m_5}{m_2 m_3 + m_1 m_4},$$

$$C_3 = e^{-2\beta l} \frac{m_1 m_5}{m_2 m_3 + m_1 m_4}, \quad C_4 = - \frac{m_1 m_5}{m_2 m_3 + m_1 m_4},$$

式中

图 4 竖向集中荷载作用下的组合梁

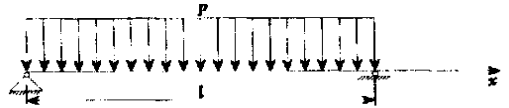


图 5 均布荷载作用下的组合梁

$$m_1 = e^{-\beta a} - e^{\beta a}, \quad m_2 = e^{-\beta a} - e^{\beta a - 2\beta l}, \quad m_3 = - (e^{\beta a} + e^{-\beta a}),$$
$$m_4 = e^{\beta a - 2\beta l} + e^{-\beta a}, \quad m_5 = - \frac{P}{\alpha \beta^3}.$$

求得 C 后, 利用(3) 式求得曲率 k , 利用(1)、(2)、(4) 式求得应变差 e 。由此可以求得集中荷载作用下任一截面的应变状态。

2 均布荷载作用下组合梁钢_混凝土交界面的应变差的计算

在竖向均布荷载作用下(14) 式的方程变为:

$$C = C_1 e^{\beta x} + C_2 e^{-\beta x} + \frac{p}{2\alpha \beta^2} \left[x^2 - lx + \frac{2}{\beta^2} \right]. \tag{17}$$

对于如图 5 所示的组合梁, (17) 式方程的边界条件为:

$$x = 0, \quad C = 0; \quad x = l, \quad C = 0,$$

式中

$$C_1 = \frac{p}{\alpha \beta^4} \frac{e^{-\beta l} - 1}{e^{-\beta l} - e^{\beta l}}, \quad C_2 = \frac{p}{\alpha \beta^4} \frac{1 - e^{-\beta l}}{e^{-\beta l} - e^{\beta l}}.$$

求得 C 后, 利用(3) 式得曲率 k , 利用(1)、(2)、(4) 式得应变差 e 。由此可以求得均布荷载作用下任一截面的应变状态。

3 对集中荷载作用下的计算公式的验证

在均布荷载作用下组合梁剪切滑移计算的理论解得到一致公认, 而集中荷载作用下各截面剪切滑移计算的理论解目前尚未见验证。所以, 为了验证本文所推导的集中荷载作用下组合梁理论解的可信度, 作者对如图 6 所示的钢_混凝土组合梁进行了对比验证。计算中将受荷载集度为 25 kN/m 的均布荷载作用的组合梁, 等效成若干个集中荷载, 分别按照两种方法进行计算。两种计算方法的结果见图 7。

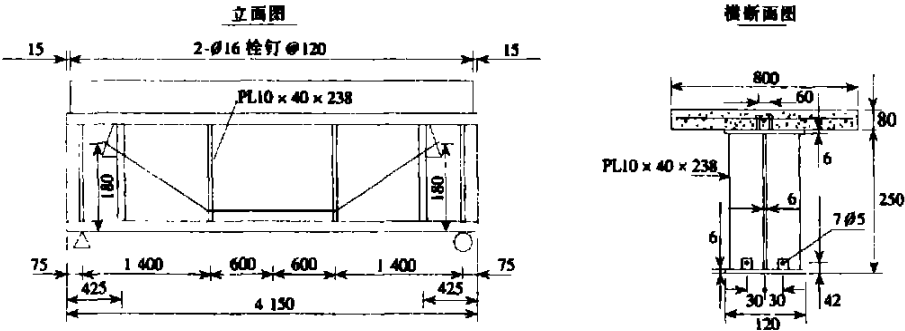
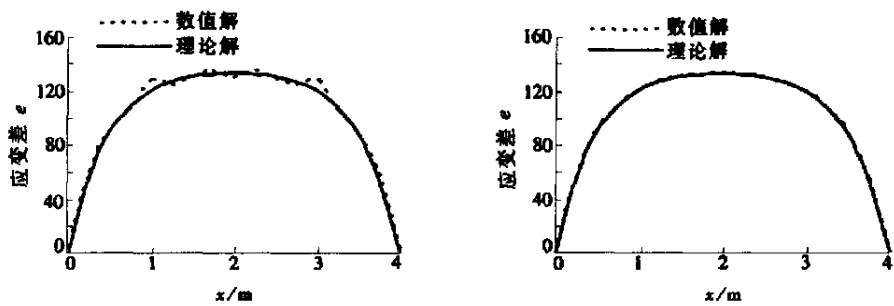


图 6 计算梁结构图

图 7(a) 为将均布荷载等效成 10 个集中荷载, 图 7(b) 为将均布荷载等效成 100 个集中荷载。由图 7 可以看出, 将均布荷载等效成多个集中荷载的计算结果与均布荷载作用下的理论解有很好的-致性, 并且随均布荷载等效成集中荷载个数的增多, 计算结果越接近均布荷载理论解 (将均布荷载等效成 10 个集中荷载时跨中截面计算误差为 2.90% 将均布荷载等效成 100 个集中荷载时跨中截面误差为 0.03%)。计算结果对比表明: 在集中荷载作用下, 按部分相互作用理论推导的在集中荷载作用下剪切滑移应变差的计算公式是正确的。



(a) 均布荷载等效 10 个集中荷载 (b) 均布荷载等效 100 个集中荷载

图 7 均布荷载作用下应变差沿梁长的分布图

4 完全共同作用和部分共同作用下跨中挠度计算对比

作者将图 6 所示结构的跨中位置加一个 100 kN 的集中荷载, 用完全相互作用理论和部分相互作用理论计算跨中位置的挠度分别为 6. 73 mm 和 7. 56 mm, 两者相差 10. 98% (部分相互作用理论计算结果是将全梁划分成 1 000 个微段, 对曲率进行数值积分得到的)• 可以看出, 按完全相互作用理论设计计算误差较大, 增加了实际工程的安全隐患, 因此钢_混凝土组合结构在交界面处的剪切滑移不可忽略, 不应采用完全相互作用理论进行设计计算•

5 结 语

本文基于弹性理论得到了钢_混凝土组合梁在竖向集中荷载作用下的剪切滑移应变差的解析解, 并将其与均布荷载作用下剪切滑移应变差公认的理论解进行了计算对比• 对比结果表明:

- 1) 随着等效集中荷载个数的增加, 计算结果向均布荷载作用下的理论解收敛• 计算结果表明本文得到的集中荷载作用下的剪切滑移应变差的计算公式是可信的•
 - 2) 在实际工程中多为集中荷载作用, 所以用本文所推导的计算公式可以很方便的解决工程实际问题, 用以指导实际工程的设计和施工•
- 计算表明钢_混凝土组合梁在竖向集中荷载作用下交界面处的剪切滑移不可忽略, 应按部分相互作用考虑•

[参 考 文 献]

[1] 劳埃 扬. 钢_混凝土组合结构设计[M]. 张陪信 译. 上海: 同济大学出版社, 1991.

[2] 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.

[3] 聂建国, 沈聚敏, 袁彦声, 等. 钢_混凝土组合梁中剪力连接件实际承载力的研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 21—28.

[4] 宗周红, 车惠民, 房贞政. 预应力钢_混凝土组合梁受弯承载力简化计算[J]. 福州大学学报, 2000, 28(2): 57—61.

[5] Seracino R, Oehlers D J, Yeo M F. Partial interaction flexural stresses in composite steel and concrete bridge beams[J]. Engineering Structures, 2001, 23(3): 1186—1193.

[6] Oven V A, Burgess I W, Plank R J, et al. An analytical model for the analysis of composite beams with partial interaction[J]. Computer & Structures, 1997, 62(3): 493—504.

Calculation Analysis of Shearing Slip for Steel_Concrete Composite Beam Under Concentrated Load

LIU Han_bing, LIU Wen_hui, ZHANG Yun_long

(College of Traffic, Jilin University, Changchun 130025, P. R. China)

Abstract: The strain's difference of steel and concrete under vertical concentrated load was analyzed on the basis of elastic theory, and was compared with ideal solution of steel and concrete under vertical uniform load. The results indicate that the computing formula conduded from the paper is believable. The practical structure usually bears concentrated load, so it can be used in the practical engineering.

Key words: composite beam; concentrated load; partial_interaction; shearing slip