

# 钢-混凝土组合直箱梁变形理论分析及应用

卢彭真<sup>1,2</sup>, 赵人达<sup>2</sup>, 诸葛萍<sup>2</sup>

(1. 浙江工业大学 建筑工程学院, 杭州 310014; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 组合箱梁结构刚度计算采用换算截面法没有考虑钢梁与混凝土翼板之间的滑移效应, 使组合箱梁刚度较实际刚度偏大而变形较实测值偏小. 利用 Goodman 弹性夹层假设, 引入轴线滑移函数考虑组合箱梁轴线变形引起的滑移效应, 通过组合箱梁受力平衡方程推导出钢-砼组合箱梁考虑滑移效应的变形平衡微分方程, 得出方程相应的通解, 根据边界条件获得钢-砼组合箱梁的变形表达式. 算例应用计算结果表明, 该分析方法能准确方便地求解钢-砼组合筒支直箱梁变形, 同时可得到钢-砼组合箱梁的内力, 为钢-砼组合箱梁的安全设计提供理论依据.

**关键词:** 钢-砼组合直箱梁; 轴向滑移函数; 滑移效应; 剪力连接程度系数

**中图分类号:** C 934

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2010)12-0186-05

钢-砼组合箱梁结构同混凝土结构相比, 可以减轻自重、减少截面尺寸、增加有效使用空间、增加结构的延性等; 同钢结构相比, 可以减少用钢量、增加刚度、稳定性及结构耐久性等. 因此, 近年来对钢-砼组合箱梁研究也日益增多, 但主要是针对工字形钢梁与混凝土翼板组合梁的研究, 研究采用的手段以试验为主<sup>[1-4]</sup>. 钢-砼组合梁中的钢梁和混凝土翼板能共同工作是由于抗剪连接件的作用, 而广泛应用的栓钉等柔性抗剪连接件在传递钢与混凝土板交接面上的水平剪力时会产生变形, 导致在交接面上引起滑移, 使截面曲率增大, 结构变形也相应增大. 据试验研究结果表明<sup>[5-8]</sup>, 由于换算截面法没有考虑钢梁和混凝土翼板之间的滑移效应, 使组合箱梁刚度较实际刚度偏大而变形值较实际值偏小, 导致组合箱梁的变形偏于不安全. 为了解钢-砼组合箱梁力学特性, 作者基于现有组合梁理论分析和试验研究的基础上<sup>[8]</sup>, 利用 Goodman 弹性夹层假设, 引入轴线滑移函数考虑组合箱梁轴线变形引起的滑移效应, 通过组合箱梁受力平衡方程以及位移与内力关系, 推导出钢-砼筒支组合直箱梁考虑滑移效应的竖向变形平衡微分方程, 得出方程相应的通解, 根据边界条件获得钢-砼筒支组合直箱梁考虑滑移效应的变形表达式, 同时求出不同剪力连接件的钢-砼筒支组合直箱梁在外荷载作用下的变形值, 并且对钢-砼不同剪力连接件组合直箱梁的变形进行分析计算, 为钢-砼组合箱梁的安全设计提供理论依据.

## 1 钢-混凝土组合直箱梁变形理论基本原理及内力与位移方程的建立

为了钢-砼组合直箱梁简化分析起见, 在利用以往组合梁(工字形钢梁与混凝土翼板所组成的组合梁)理论分析和试验研究的基础上, 结合钢-砼组合箱梁的结构特点, 在分析钢-砼组合直箱梁竖向变形时近似地将钢-砼组合直箱梁作为弹性体来考虑, 并做6个假设:

- 1) 钢箱梁和砼翼板均为各向同性的弹性体;
- 2) 钢箱梁和砼翼缘板具有相同的曲率并分别符合平截面假定;
- 3) 剪力连接件等效地利用 Goodman 连续的弹性介质代替, 即认为在钢箱梁两侧腹板与砼翼缘板之间有一层与上下层梁紧密接触的可传递竖向反力和水平剪力的弹性夹层, 该夹层的竖向反力正比于上层砼

收稿日期: 2010-04-10.

基金项目: 教育部优秀青年教师基金项目(教人司[2000]11号).

作者简介: 卢彭真(1974—), 男, 浙江温州人, 高级工程师.

翼缘板底与下层钢箱梁两侧腹板顶板的相对挠度差(即掀起量), 水平剪力正比于钢箱梁腹板与砼翼缘板的相对水平位移差(即滑移量);

4) 钢-砼组合直箱梁的剪力滞、畸变翘曲、上下翼缘板的竖向挤压力、平面剪切变形、横向弯曲以及横向应变等忽略不计;

5) 忽略任何面上的掀起及连接件变形对钢-砼组合直箱梁的影响, 认为两者竖向变形一致;

6) 不考虑剪切变形对滑移的影响.

基于以上的假定, 引入轴线滑移函数考虑组合直箱梁轴线变形引起的滑移效应, 以均布和集中荷载分别作用下的钢-砼筒支组合直箱梁为研究对象, 取出钢-砼组合直箱梁某截面一微段  $dz$  为分析目标进行受力分析, 钢箱梁和砼翼缘板的受力如图 1.  $N_c$  为砼翼缘板轴向力,  $N_s$  为钢箱梁轴向力,  $M_c$  为作用在砼翼缘板上的弯矩,  $M_s$  为作用在钢箱梁上的弯矩,  $Q_c$  为作用在翼缘板的剪力,  $Q_s$  为作用在钢箱梁的剪力,  $T_c$  为作用在翼缘板的扭矩,  $T_s$  为作用在钢箱梁的扭矩,  $q_v$  为单位梁长的竖向挤压力,  $q_u$  为单位梁长的钢箱梁腹板顶板与翼缘板界面上的剪力. 根据翼缘板和钢箱梁各自的受力及平衡条件, 可得翼缘板和钢箱梁的 6 个受力平衡方程. 然后根据内力与位移之间的关系, 结合混凝土板与钢箱梁的平衡方程可得

$$-E_c I_{cx} y''' = Q_{cy} - h_c q_z \tag{1}$$

$$-E_s I_{sx} y''' = Q_{sy} - h_s q_z \tag{2}$$

$$E_c A_c w_c'' = -q_u \tag{3}$$

$$E_s A_s w_s'' = q_u \tag{4}$$

式中,  $E_c$  为翼缘板的弹性模量;  $I_{cx}$  为翼缘板的截面惯性矩;  $A_c$  为翼缘板的横截面面积;  $E_s$  为钢梁的弹性模量;  $I_{sx}$  为钢梁的截面惯性矩;  $A_s$  为钢梁的横截面面积;  $G_c$  为翼缘板的剪切模量;  $G_s$  为钢箱梁的剪切模量;  $I_{cd}$  为翼缘板的抗扭惯性矩;  $I_{sd}$  为钢箱梁的抗扭惯性矩;  $I_{cw}$  为翼缘板的扇形惯性矩;  $I_{sw}$  为钢箱梁的扇形惯性矩.

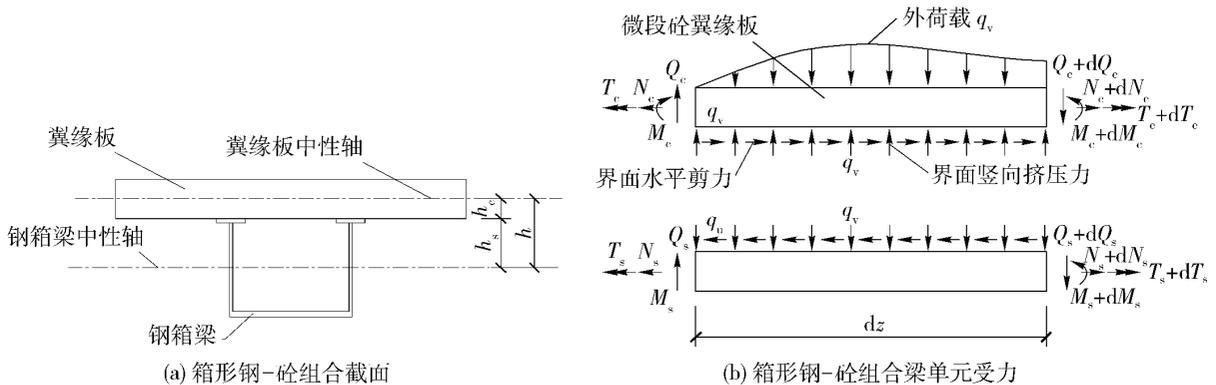


图 1 箱形钢-砼组合梁横截面和单元分析

Fig.1 Element analysis and cross section of the Steel-concrete composite box girders

由基本假设可知, 钢-砼组合直箱梁连接件所形成的弹性夹层中界面单位长度的水平剪力为

$$q_u = k_u (w_s - w_c + (h_c + h_s) y') \tag{5}$$

式中,  $k_u$  为连接件所构成的等效弹性夹层单位梁长的滑移刚度, 为连接件的滑移刚度, 它与栓钉的直径、材料强度等因素有关,  $k_u = K/u$ ;  $u$  为栓钉连接件间距;  $(w_s - w_c)$  为翼缘板和钢箱梁界面轴线变形引起的滑移;  $(h_c + h_s) y'$  为翼缘板和钢箱梁各自绕其自身的中性轴弯曲在界面上引起相对的滑移量. 并设  $w' = (w_c - w_s) / h$ .

## 2 筒支组合直箱梁在均布力下竖向变形微分方程的建立

为了反应钢-砼组合直箱梁的连接程度系数以及组合程度系数, 引入了连接程度系数和组合程度系

数<sup>[8-9]</sup>,即:连接程度系数 $\beta_z = l \sqrt{(C^* \alpha_z / (EI_x))}$ ;组合程度系数 $\alpha_z = 1 + EI_x / EI_0$ ,其中 $C^* = k_u h^2$ .

根据钢-砼组合直箱梁在均布荷载作用下的受力平衡方程、内力与位移之间的关系以及组合直箱梁界面连接件受力方程,通过复杂的数学运算可得考虑滑移的钢-砼筒支组合直箱梁挠度微分方程为

$$\frac{d^6 y}{dt^6} - \beta_z^2 \frac{d^4 y}{dt^4} = -\frac{\beta_z(\alpha_z - 1) l^4}{EI_x \alpha_z} q_y \quad (6)$$

根据筒支梁的边界条件可得钢-砼组合直箱梁在竖向均布荷载 $q_y$ 作用下的变形解析表达式为

$$y = \frac{l^4 q_y}{24 EI_x \alpha_z} \left[ (\alpha_z - 1) t(1 - 2t^2 + t^3) + \frac{12}{\beta_z} t(1 - t) + \frac{24}{\beta_z^4 sh\beta} (sh\beta t + sh\beta(1 - t) - sh\beta) \right] \quad (7)$$

### 3 筒支组合直箱梁在集中力下竖向变形微分方程的建立

钢-砼组合直箱梁在集中力作用下,根据钢-砼组合直箱梁在集中荷载作用下的受力平衡方程、内力与位移之间的关系以及组合直箱梁界面连接件受力方程,通过复杂的数学运算可得考虑滑移的钢-砼筒支组合直箱梁在集中力作用下的竖向变形微分方程为

$$\frac{d^6 y}{dt^6} - \beta_z^2 \frac{d^4 y}{dt^4} = 0 \quad (8)$$

根据筒支梁的边界条件,可得钢-砼组合箱梁在集中力 $p$ 作用下变形的解析表达式为

$$y_1 = \left\{ \frac{pl^3 t_0}{6 EI_0 \alpha_z} (1 - t_0) (7t_0 - 4t_0^2 - 2) - \frac{pl^3}{\alpha_z (1 - \alpha_z) \beta_z^3 EI_0} \cdot \left[ \frac{t_0 (sh\beta_z (1 - t_0) - \beta_z (1 - t_0) ch\beta_z (1 - t_0))}{ch\beta_z (1 - t_0)} + \frac{(1 - t_0) (cht_0 - \beta_z (1 - t_0) ch\beta_z t_0)}{ch\beta_z t_0} \right] \right\} t - \frac{p(1 - t_0) l^3}{6 EI_0 \alpha_z} t^3 + \frac{p(1 - t_0) l^3}{\alpha_z (1 - \alpha_z) \beta_z^3 EI_0 ch\beta_z t} sh\beta_z t \quad (9)$$

$$y_2 = \left\{ \frac{pl^3 t_0}{6 EI_0 \alpha_z} (1 - t_0) (4t_0^2 - t_0 - 1) + \frac{pl^3}{\alpha_z (1 - \alpha_z) \beta_z^3 EI_0} \cdot \left[ \frac{t_0 (sh\beta_z (1 - t_0) - t_0 \beta_z ch\beta_z (1 - t_0))}{ch\beta_z (1 - t_0)} + \frac{(1 - t_0) (sh\beta_z t_0 - \beta_z t_0 ch\beta_z t_0)}{ch\beta_z t_0} \right] \right\} (1 - t) + \frac{t_0 pl^3}{6 EI_0 \alpha_z} (1 - t)^3 - \frac{pt_0 l^3}{\alpha_z (1 - \alpha_z) \beta_z^3 EI_0 ch\beta_z (1 - t_0)} sh\beta_z (1 - t) \quad (10)$$

### 4 不同剪力连接件间距组合直箱梁变形计算应用

利用文献[10]钢-砼组合直箱梁为算例,钢-砼组合直箱梁的横截面尺寸见图2,翼缘板混凝土的设计标号为C30,弹性模量 $E_c = 29.5 \text{ GPa}$ ,泊松比 $\nu_c = 0.3$ ,钢箱梁为Q235钢板,腹板为8 mm厚度的钢板,底

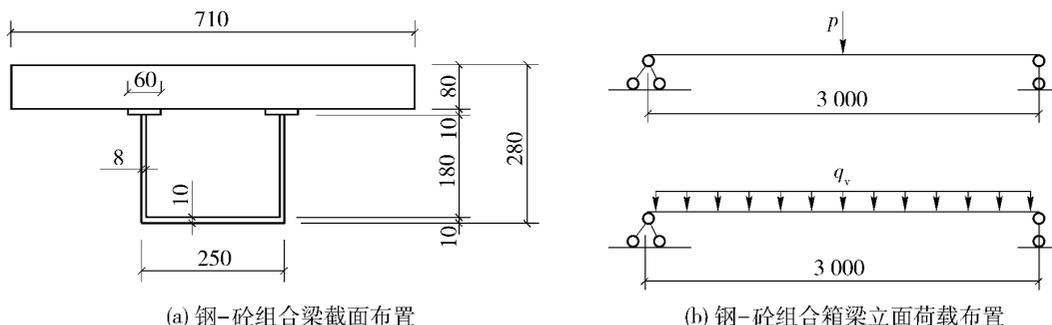


图2 钢-砼组合箱梁截面及荷载布置(单位: mm)

Fig. 2 Loading arrangement and cross section of Steel-concrete composite box girders (unit: mm)

板为 10 mm 厚度的钢板, 栓钉采用  $\varnothing 13 \sim 150$  mm, 沿箱梁腹板纵向均匀布置, 钢-砼筒支组合直箱梁跨长为 3 000 mm, 简支组合直箱梁在均布荷载  $q_y = 100$  kN/m 和跨中集中力  $P = 300$  kN 两种荷载工况作用下, 箱形组合梁采用 3 种剪力连接方式, 剪力连接件间距分别是  $D = 150$  mm,  $D = 300$  mm,  $D = 450$  mm, 求解在 2 种荷载工况下 3 种不同剪力连接方式的组合箱梁任意截面的变形, 变形计算结果见表 1~2。

表 1 均布荷载下 3 种不同剪力连接件变形分布

梁轴线 坐标	连接件间距			梁轴线 坐标	连接件间距		
	$D = 150$ mm	$D = 300$ mm	$D = 450$ mm		$D = 150$ mm	$D = 300$ mm	$D = 450$ mm
0	0	0	0	975	-4.70	-5.32	-5.71
75	-0.441	-0.499	-0.533	1 275	-5.34	-6.15	-6.48
375	-2.14	-2.42	-2.59	1 500	-5.48	-6.21	-6.66
675	-3.61	-4.08	-4.37				

表 2 集中力荷载下 3 种不同剪力连接件变形分布

梁轴线 坐标	连接件间距			梁轴线 坐标	连接件间距		
	$D = 150$ mm	$D = 300$ mm	$D = 450$ mm		$D = 150$ mm	$D = 300$ mm	$D = 450$ mm
0	0	0	0	975	-7.40	-5.32	-5.71
75	-0.654	-0.499	-0.533	1 275	-8.59	-6.15	-6.48
375	-3.21	-2.42	-2.59	1 500	-8.89	-6.21	-6.66
675	-5.53	-4.08	-4.37				

## 5 结论

1) 考虑截面滑移的钢-砼组合箱梁的变形微分方程能正确、方便地处理组合箱梁的挠度的求解问题, 同时根据边界条件得到相应的变形解析表达式, 并且微分方程的解析解直接作为位移场的形函数, 为组合箱梁有限元的分析提供理论依据。

2) 钢-砼组合直箱梁的变形随着剪力连接件间距的增大而增大, 均布荷载下的挠度比集中力下的计算结果更加合理, 主要原因是均布荷载下, 界面处栓钉的受力相对集中力荷载下要符合假定条件。

### 参考文献:

- [1] 孙文彬. 部分剪力连接件钢-混凝土筒支梁组合梁变形计算[J]. 辽宁工程计算大学学报, 2003, 22(1): 71-73.  
SUN Wen-bin. Predicting deflection of simply supported steel-concrete composite beams with partial shear connection [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(1): 71-73. (in Chinese)
- [2] 聂建国, 唐亮, 胡少伟, 等. 钢-混凝土组合箱梁的抗扭强度[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 1-11.  
NIE Jian-guo, TANG Liang, HU Shao-wei, et al. Torsional strength of steel-concrete composite box girders [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(1): 1-11. (in Chinese)
- [3] 聂建国, 樊健生. 广义组合结构及其发展展望[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 1-8.  
NIE Jian-guo, FAN Jian-sheng. The development and prospect of generalized composite structures [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(6): 1-8. (in Chinese)
- [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.  
NIE Jian-guo, YU Zhi-wu. Research and practice of composite steel-concrete beams in China [J]. China Civil Engineering

- Journal, 1999, 32(2): 3-8. (in Chinese)
- [5] 王连广, 许伟, 朱浮声, 等. 钢板与轻骨料混凝土组合梁试验研究[J]. 东北大学学报, 2002, 23(12): 1193-1196.  
WANG Lian-guang, XU Wei, ZHU Fu-sheng, et al. Experimental research of steel plate and light aggregate concrete composite beams [J]. Journal of Northeastern University, 2002, 23(12): 1193-1196. (in Chinese)
- [6] 聂建国, 沈聚敏, 袁彦声, 等. 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(11): 21-27.  
NIE Jian-guo, SHEN Ju-min, YUAN Yan-sheng, et al. A general formula for predicting the deflection of simply supported composite steel-concrete beams with the consideration of slip effect [J]. Engineering Mechanics, 1994, 11(11): 21-27. (in Chinese)
- [7] 王连广, 许伟, 李立新. 滑移效应影响下的组合梁变形计算公式[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2000, 16(4): 254-255.  
WANG Lian-guang, XU Wei, LI Li-xin. Calculating formulae of the deformation on the steel and concrete composite beams under slip effect [J]. Journal of Shenyang Arch. and Civ. Eng. Inst, 2000, 16(4): 254-255. (in Chinese)
- [8] 刘云平, 赵建昌, 包华. 考虑界面滑移的钢-混凝土组合梁的新解法[J]. 结构工程师, 2007, 23(5): 35-40.  
LIU Yun-ping, ZHAO Jian-chang, BAO Hua. A new method for steel-concrete composite beams considering interface slip [J]. Structural Engineers, 2007, 23(5): 35-40. (in Chinese)
- [9] 包世华. 新编高层建筑结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [10] 胡少伟. 组合梁抗扭分析与设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

## Deformation Theory of Steel-concrete Composite Straight-line Box Girders and Application

LU Peng-zhen<sup>1,2</sup>, ZHAO Ren-da<sup>2</sup>, ZHU Ge-ping<sup>2</sup>

(1. Zhejiang University of Technology, College of Civil Engineering and Architecture, Hangzhou 310014 China;

2. Southwest Jiaotong University, School of Civil Engineering, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** On the basis of previous study, stiffness calculation of the steel-concrete composite box girders is adopted to the transformed section, and the effect of slipping is not be considered in the Rigidity calculation. Because of the effect of slipping, the calculated stiffness is slightly larger than the actual stiffness of the steel-concrete composite box girders but the deformation is relatively small, which is not safe in the deformation. Using Goodman elastic multiplayer assumption, the effect of slipping of the Axis Deformation is considered by the function of the Axis slip. On the basis of the force and geometric equilibrium equation, the deformation differential equation of the steel-concrete composite box girders based on the effect of slipping is presented, so the general solution is obtained. According to the boundary conditions, the computational expressions of the deformation based on the effect of slipping are acquired. By the application of an practical engineering example, the research results show that this theory is correct and convenient to solve the problem of the deformation of the steel-concrete composite box girders, and arbitrary crossinternal forces of the steel-concrete composite box girders are obtained. The research results can provide the theoretical basis for the safety design of the steel-concrete composite box girders.

**Key words:** steel-concrete composite straight box girders; function of the axial slip; slip effect; the shear connection degree coefficients

(责任编辑 郑筱梅)