

# 集束群钉式装配式组合梁界面滑移计算

范亮<sup>1,2</sup>, 徐英铭<sup>1</sup>, 谭阳<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学山区桥梁与隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:** 针对由预留后浇孔的预制板和集束布置剪力钉的钢梁组成的装配式钢-混组合梁, 研究了其非连续界面剪力连接下的装配式组合梁界面滑移计算理论。基于梁变形理论, 将间断剪力连接的装配式组合梁分为有剪力连接区和无剪力连接区, 并分别建立了界面滑移微分方程; 基于位移连续和变形协调条件, 建立了间断剪力连接组合梁界面滑移分布表达式, 求解出集中荷载和均布荷载作用下的界面滑移分布解析表达式; 经与现有连续剪力连接的组合梁滑移分布方程以及装配式组合梁试验实测数据进行对比, 验证了该组合梁滑移分布算法的正确性。采用该算法开展了混凝土板与钢梁的高度比、抗剪连接度和集束度(反映键群集束程度的指标, 定义为单个(排)预留孔中剪力键数量与全梁剪力键数量的比值)对装配式组合梁滑移和变形的参数影响分析, 结果表明: 界面滑移随抗剪连接度的增大而减小, 随高度比和集束度的增大而增大; 集束度越大, 滑移分布越不均匀, 在无剪力连接区出现峰值。

**关键词:** 结构工程; 钢混组合梁; 界面滑移; 解析法; 装配式; 集束钉群

**中图分类号:** TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2533-09

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211225

## Interface slip calculation of prefabricated steel-concrete composite beams with clustering studs

FAN Liang<sup>1,2</sup>, XU Ying-ming<sup>1</sup>, TAN Yang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** For fabricated steel-concrete composite beams composed of concrete slabs with reserved post-pouring holes and steel beam with arranged discrete shear connectors, the interface slip distribution theory of fabricated steel-concrete composite beam with discrete interface shear connection is studied. Based on the beam deformation theory, fabricated composite beams with discrete shear connection are divided into shear connection area and non-shear connection area and the interface slip differential equations are established respectively based the displacement continuity and deformation coordination conditions. The interface slip distribution expression of intermittent shear connection composite beam are formulated, and the analytical expression of interface slip distribution under concentrated load and uniform load are solved. Through comparing with the existing slip distribution equation of continuous shear connection composite

收稿日期: 2021-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20312).

作者简介: 范亮(1979-), 女, 教授, 博士. 研究方向: 钢-砼组合结构. E-mail: fanliang@cqjtu.edu.cn

beam and the measured data of fabricated composite beam test, the slip distribution algorithm is verified. The influence of various parameters on slip and deformation of fabricated composite beams is analyzed with the parameters as the height ratio of concrete slab to steel beam, the shear connection degree and the clustering degree (an index reflecting the degree of bond clustering, defined as the ratio of the number of shear connectors in a (row) reserved hole to the number of shear connectors in the beam). The results show that the interface slip decreases with the increase of the shear connection degree, and increases with the increase of the height ratio and the clustering degree; the larger the clustering degree, the more uneven slip distribution, and peak value appears in the non-shear connection area.

**Key words:** structure engineering; steel-concrete composite beam; interface slip; analytical algorithm; fabricate; clustering studs

## 0 引言

钢-混组合结构是由钢和混凝土两种不同材料组合在一起、通过剪力键的剪力连接作用实现共同工作的一种组合构件<sup>[1,2]</sup>。在荷载作用下,钢梁和混凝土交界面由于剪力键变形不可避免地产生界面滑移,而滑移的存在将降低结构刚度、增大结构变形<sup>[3-6]</sup>,因此,需要对组合梁界面滑移规律进行探讨和分析。

根据混凝土施工和剪力键的布置形式可以将钢-混组合梁分为连续分布剪力键的现浇混凝土板组合梁和集束布置剪力键的预制混凝土板-装配式组合梁。当前国内外组合梁滑移分布计算方法的研究基本未考虑剪力连接沿梁纵向的变化,针对剪力键连续均匀分布的组合梁,Newmark等<sup>[7]</sup>推导了采用均匀布置剪力键的组合梁线性滑移计算理论。蒋丽忠等<sup>[8]</sup>利用 Goodman 弹性夹层假设,推导出可以描述滑移与挠度相互关系的界面滑移理论公式。聂建国<sup>[9]</sup>通过分析滑移与栓钉抗剪刚度的关系,推导出考虑线性滑移的组合梁滑移计算方法。周世军等<sup>[10]</sup>基于能量变分法,建立了考虑剪力滞效应的单箱双室钢-混组合梁控制微分方程,得到均布荷载作用下计算滑移的连续函数。项贻强等<sup>[11]</sup>采用龄期调整有效弹性模量法,在线性滑移的假定下,推导了考虑混凝土收缩徐变效应和施加预应力的钢-混组合梁滑移连续函数。

对于采用预留孔内集束布置剪力键的非连续剪力连接预制-装配式组合梁,在不考虑混凝土与钢梁之间的摩擦力时,界面抗剪分区间断分布,滑移分布为分段连续非线性函数。因此,前述考虑

连续滑移的滑移理论计算对于这类装配式组合梁不再适用。目前,对于考虑非连续滑移的相关研究较少,并且大多采用有限元法研究某具体情况下的非连续滑移分布规律<sup>[12]</sup>,鲜有更具普遍意义的理论研究。

本文根据剪力键间断布置的装配式组合梁界面抗剪非连续分布的特点,将组合梁分为有剪力连接区和无剪力连接区,分别建立了基于双层弹性梁理论的滑移分布微分方程,根据二者位移连续及变形协调条件给出约束方程,建立了考虑非连续剪力连接滑移的装配式组合梁滑移分布算法。最后,对该算法的可行性进行了验证,并采用该算法研究了抗剪连接度、集束度以及混凝土与钢梁高度比等参数对滑移分布以及变形的影响。

## 1 有、无剪力连接区的界面滑移方程

### 1.1 基本假定

在设计荷载作用下,组合梁可以认为处于弹性工作阶段<sup>[13-15]</sup>。因此,在分析中近似地将组合梁作为弹性体进行讨论。为简化理论推导过程,作出以下假设。

(1)钢与混凝土各自符合平截面假定,且具有相同的曲率。

(2)钢与混凝土均为线弹性材料。

(3)界面抗剪刚度在有剪力连接区均匀分布。

(4)忽略钢与混凝土交界面摩擦力的影响。

(5)集束式剪力键群的键群大小和群间间距沿梁长不变。

(6)有剪力连接区中,钢与混凝土界面剪应力  $\tau(x)$  与界面滑移量  $S(x)$  成正比,即  $\tau(x) =$

$KS(x)$ 。

(7)当组合梁中剪力键连续均匀分布在钢-混凝土界面,剪力键刚度近似沿梁长方向均匀分布。装配式组合梁则是将剪力键群分散布置,键群间的间距相对剪力键尺寸不可忽略,键群间与键群内的剪力连接程度差异明显,因此界面抗剪分布表现为分段式分布。现浇组合梁和装配式组合梁剪力键分布以及剪力分布如图 1 所示。因此,在分析类似间断剪力连接的装配式组合梁滑移分布时,沿梁长定义为两类区段:一类是布置剪力键的有剪力连接区;另一类是未布置剪力键的无剪力连接区。依据前述假定,界面单位长度抗滑移刚度  $K$  的表达式为:

$$K = \begin{cases} 0, & x \text{ 位于无剪力连接区} \\ \eta k/l_1, & x \text{ 位于有剪力连接区} \end{cases}$$

式中: $\eta$ 为每个有剪力连接区内剪力键的数量; $k$ 为单个剪力键的抗剪刚度; $l_1$ 为有剪力连接区沿梁长方向的长度。

### 1.2 有剪力连接区的界面滑移分布方程

在有剪力连接区上截取长度为  $dx$  的微元体,如图 2 所示。图 2 中, $M(x)$ 、 $M_c(x)$ 、 $M_s(x)$  分别为距跨中  $x$  处全截面弯矩、混凝土截面弯矩和钢梁截面弯矩,均以构件下表面受拉为正,受压为负; $F_c(x)$ 、 $F_s(x)$  分别为混凝土和钢梁的截面轴力,均以受拉为正,受压为负; $V_c(x)$ 、 $V_s(x)$  分别为混凝土和钢梁所承担的剪力; $d$  为混凝土形心到钢梁形心的距离; $h_c$ 、 $h_s$  分别为混凝土板厚度和钢梁高度。

根据微元体受力分析及平衡方程,可得:

$$\frac{dM_c(x)}{dx} + \frac{dM_s(x)}{dx} + V_c(x) + V_s(x) + \frac{dV_c(x)}{dx} + \frac{dV_s(x)}{dx} - \tau(x)d = 0 \quad (1)$$

根据梁变形理论,在小变形情况下可建立如下关系式:

$$\varphi(x) = \frac{M_s(x)}{E_s I_s} = \frac{M_c(x)}{E_c I_c} = \frac{\alpha_E M_c(x)}{E_s I_c} \quad (2)$$

式中: $\varphi(x)$ 为曲率; $E_c$ 、 $E_s$ 分别为混凝土和钢梁的弹性模量; $I_c$ 、 $I_s$ 分别为混凝土和钢梁的截面惯性矩; $\alpha_E$ 为钢梁与混凝土板弹性模量之比, $\alpha_E = E_s/E_c$ 。

联合式(1)(2),并利用关系式  $\tau(x) = KS(x)$  可得:

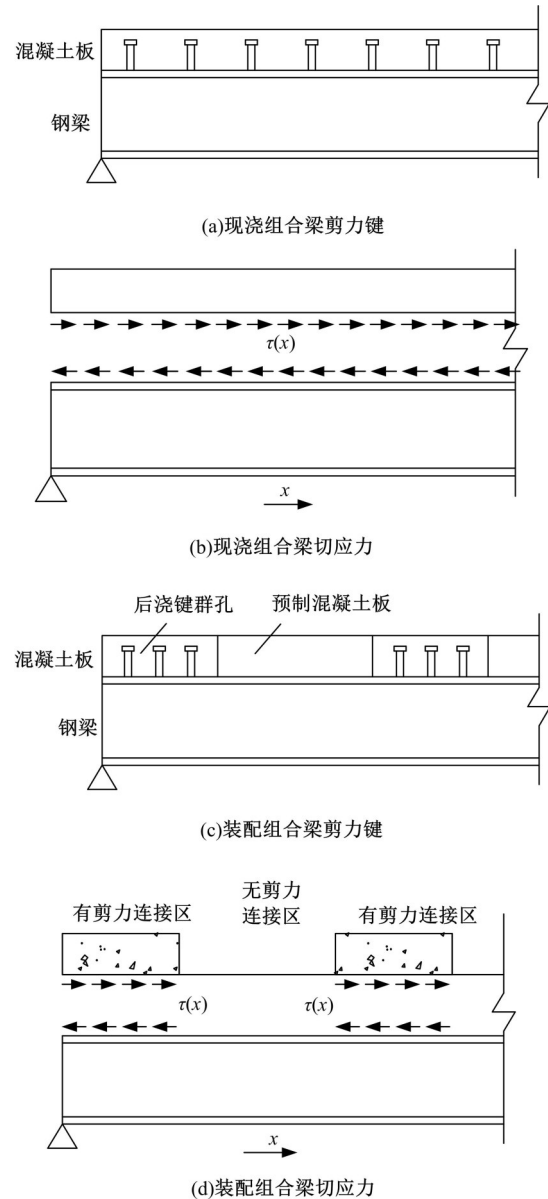


图 1 现浇及装配式组合梁界面剪力分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of interface shear force distribution of cast-in-place and fabricated composite beams

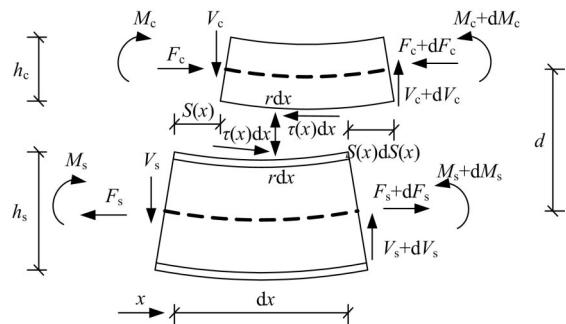


图 2 微元体受力图

Fig. 2 Load state of micro element

$$\frac{d\varphi}{dx} = \frac{S(x)Kd - \left( (V_c + V_s) + \frac{dV_c}{dx} + \frac{dV_s}{dx} \right)}{\gamma} \quad (3)$$

式中:  $\gamma = E_c I_c + E_s I_s$ 。

图 3 为组合梁截面应变分布图, 图中  $\epsilon_c$ 、 $\epsilon_s$  分别为组合梁交界面混凝土板和钢梁应变,  $S'(x)$  为交界面相对滑移应变。截面应力、应变均以受拉为正, 受压为负。界面滑移以混凝土相对钢梁向左滑移为正, 向右为负。

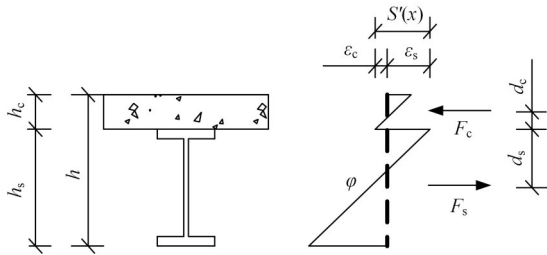


图 3 截面应变分布  
Fig. 3 Strain distribution

根据假设(1), 并考虑轴向力对隔离微元体变形的影响, 可得:

$$S'(x) = \epsilon_s - \epsilon_c = \frac{F_s(x)}{A_s E_s} - \frac{F_c(x)}{A_c E_c} - \varphi(x)(d_c + d_s) = \frac{F_s(x)}{A_s E_s} - \frac{F_c(x)}{A_c E_c} - \varphi(x)d \quad (4)$$

沿  $x$  方向对微元体中的混凝土和钢梁分别列平衡方程, 整理可得如下关系式:

$$\begin{cases} \frac{dF_c(x)}{dx} = -\tau(x) \\ \frac{dF_s(x)}{dx} = \tau(x) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\tau(x) = KS(x)$ 。

对式(4)求导, 将式(3)代入其中, 并利用如上关系式化简可得:

$$S''(x) = S(x)K \left( \frac{d^2}{\gamma} + \frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_s A_s} \right) - \left( V_c + V_s + \frac{dV_c}{dx} + \frac{dV_s}{dx} \right) d / \gamma \quad (6)$$

### 1.3 无剪力连接区的界面滑移分布方程

以组合梁跨中为坐标原点建立坐标系, 取  $x$  处的左侧部分组合梁为隔离体进行分析, 如图 4 所示, 图中  $l_1$ 、 $l_2$  分别为有剪力连接区和无剪力连接区沿梁长方向的长度。

图 4 中由隔离体整体弯矩平衡可得:

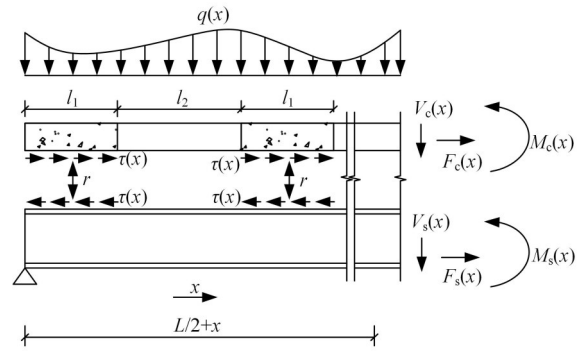


图 4 隔离体

Fig. 4 Isolated body

$$M(x) = M_c(x) + M_s(x) + F(x)d = \varphi(x)\gamma + F(x)d \quad (7)$$

式中:  $F(x)$  为距跨中  $x$  处左侧所有剪力连接区的界面剪力之和。

由图 3 中截面应变关系可得:

$$F_c(x) = A_c E_c [-\varphi(x)d_c + \epsilon_c] \quad (8)$$

$$F_s(x) = A_s E_s [\varphi(x)d_s + \epsilon_s] \quad (9)$$

将式(4)代入式(9), 并结合  $x$  方向平衡条件可得:

$$\epsilon_c = \frac{\varphi(x)(\lambda d_c - d_s) - S'(x)}{1 + \lambda} \quad (10)$$

式中:  $\lambda = \frac{A_c E_c}{A_s E_s}$ 。

将式(10)代入式(8)可得:

$$F(x) = -F_c(x) = A_c E_c \frac{S'(x) + \varphi(x)d}{1 + \lambda} \quad (11)$$

联立式(11)和式(7)可得:

$$F(x) = \frac{A_c E_c M(x)d + \gamma A_c E_c S'(x)}{\gamma(1 + \lambda) + A_c E_c d^2} \quad (12)$$

式(12)可写作:

$$F(x) = \chi M(x) + \mu S'(x) \quad (13)$$

$$\chi = \frac{A_c E_c d}{\gamma(1 + \lambda) + A_c E_c d^2}$$

$$\mu = \frac{\gamma A_c E_c}{\gamma(1 + \lambda) + A_c E_c d^2}$$

### 1.4 有、无剪力连接区的位移及变形约束条件

将跨中至梁端的有剪力连接区和无剪力连接区滑移交替表示为  $S_1(x)$ 、 $S_2(x)$ 、 $\dots$ 、 $S_n(x)$ , 滑移应变交替表示为  $S'_1(x)$ 、 $S'_2(x)$ 、 $\dots$ 、 $S'_n(x)$ ,  $n$  为半跨梁有剪力和无剪力连接区的段数之和。由变形

协调条件,可知剪力连接区和无剪力连接区界面处的滑移以及滑移应变相等,即:

$$\begin{cases} S_1(-l_1) = S_2(-l_1) \\ S_2(-l_1 - l_2) = S_2(-l_1 - l_2) \\ \vdots \\ S_{n-1}\left(\frac{-nl_1 - (n-1)l_2}{2}\right) = \\ S_n\left(\frac{-nl_1 - (n-1)l_2}{2}\right) \\ S'_1(-l_1) = S'_2(-l_1) \\ S'_2(-l_1 - l_2) = S'_2(-l_1 - l_2) \\ \vdots \\ S'_{n-1}\left(\frac{-nl_1 - (n-1)l_2}{2}\right) = \\ S'_n\left(\frac{-nl_1 - (n-1)l_2}{2}\right) \end{cases}$$

结构跨中对称,因此跨中截面滑移为零,即:  
 $S_1(0) = 0$ 。

端部:  $S'_n\left(\frac{-nl_1 - nl_2}{2}\right) = 0$ 。

**1.5 两种常见荷载作用下的界面滑移分布解析**

(1) 跨中集中荷载  $P$  作用下

有剪力连接区,式(6)应满足:

$$\begin{cases} V_c + V_s = P/2 \\ \frac{dV_c}{dx} = \frac{dV_s}{dx} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)代入式(6)整理并简化可得:

$$S''(x) = \alpha^2 S(x) - \frac{\alpha^2 \beta P}{2} \quad (15)$$

式中:  $\alpha^2 = K\left(\frac{d^2}{\gamma} + \frac{1}{E_c A_c} + \frac{1}{E_s A_s}\right)$ ;  $\beta = \frac{d}{KA_0}$ ;

$$A_0 = d^2 + \frac{\gamma}{E_s A_1}; \frac{1}{A_1} = \frac{\alpha_E}{A_c} + \frac{1}{A_s}。$$

对式(15)进行求解,可得滑移方程的通解为:

$$S(x) = c_1 e^{\alpha x} + c_2 e^{-\alpha x} + \frac{\beta P}{2} \quad (16)$$

式中:  $c_1, c_2$  均为任意常数。

无剪力连接区,式(13)中  $F(x)$  为常数,  $M(x)$  为关于  $x$  的一次函数,由此可知  $S'(x)$  也是关于  $x$  的一次函数,则  $S(x)$  是关于  $x$  的二次函数,

二次项系数  $z_1$  为:

$$z_1 = -\frac{\chi P}{4\mu} \quad (17)$$

因此,滑移方程的通解为:

$$S(x) = z_1 x^2 + c_3 x + c_4 \quad (18)$$

式中:  $c_3, c_4$  均为任意常数。

综上所述,界面滑移表达式为:

$$S(x) = \begin{cases} c_1 e^{\alpha x} + c_2 e^{-\alpha x} + \frac{\beta P}{2}, & -\frac{l}{2} \leq x < -\frac{l}{2} + l_1 \\ z_1 x^2 + c_3 x + c_4, & -\frac{l}{2} + l_1 \leq x < -\frac{l}{2} + l_1 + l_2 \\ c_5 e^{\alpha x} + c_6 e^{-\alpha x} + \frac{\beta P}{2}, & -\frac{l}{2} + l_1 + l_2 \leq x < -\frac{l}{2} + 2l_1 + l_2 \\ z_1 x^2 + c_7 x + c_8, & -\frac{l}{2} + 2l_1 + l_2 \leq x < -\frac{l}{2} + 2l_1 + 2l_2 \\ \vdots \\ c_{2n-1} e^{\alpha x} + c_{2n} e^{-\alpha x} + \frac{\beta P}{2}, & -\frac{l}{2} + \frac{n(l_1 + l_2)}{2} \leq x \leq 0 (n \text{ 为奇数}) \\ z_1 x^2 + c_{2n-1} x + c_{2n}, & -\frac{l}{2} + \frac{n(l_1 + l_2)}{2} + l_1 \leq x \leq 0 (n \text{ 为偶数}) \end{cases} \quad (19)$$

(2) 均布荷载  $q$  作用下

有剪力连接区,式(6)应满足下式:

$$\begin{cases} V_c + V_s = -qx \\ \frac{dV_c}{dx} + \frac{dV_s}{dx} = -q \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(6)整理并简化,再进行求解,可得到滑移方程的通解:

$$S(x) = c_1 e^{\alpha x} + c_2 e^{-\alpha x} - 2\beta q(x+1) \quad (21)$$

无剪力连接区,式(13)中  $F(x)$  为常数,  $M(x)$  为关于  $x$  的二次函数,由此可知  $S'(x)$  也是关于  $x$  的二次函数,且一次项系数为零,则  $S(x)$  是关于  $x$  的三次函数,且二次项系数为零,三次项系数  $z_2$  为:

$$z_2 = \frac{\chi q}{6\mu} \quad (22)$$

因此,滑移方程的通解为:

$$S(x) = z_2 x^3 + c_3 x + c_4 \quad (23)$$

综上所述,界面滑移表达式为:

$$S(x) = \begin{cases} c_1 e^{ax} + c_2 e^{-ax} - 2\beta q(x+1), & -\frac{l}{2} \leq x < -\frac{l}{2} + l_1 \\ z_2 x^3 + c_3 x + c_4, & -\frac{l}{2} + l_1 \leq x < -\frac{l}{2} + l_1 + l_2 \\ c_5 e^{ax} + c_6 e^{-ax} - 2\beta q(x+1), & -\frac{l}{2} + l_1 + l_2 \leq x < -\frac{l}{2} + 2l_1 + l_2 \\ z_2 x^3 + c_7 x + c_8, & -\frac{l}{2} + 2l_1 + l_2 \leq x < -\frac{l}{2} + 2l_1 + 2l_2 \\ \vdots \\ c_{2n-1} e^{ax} + c_{2n} e^{-ax} - 2\beta q(x+1), & -\frac{l}{2} + \frac{n(l_1+l_2)}{2} \leq x \leq 0 (n \text{ 为奇数}) \\ z_2 x^3 + c_{2n-1} x + c_{2n}, & -\frac{l}{2} + \frac{n(l_1+l_2)}{2} + l_1 \leq x \leq 0 (n \text{ 为偶数}) \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $c_1, c_2, \dots, c_{2n}$  构成系数矩阵  $c$ , 可利用边界条件建立系数矩阵  $c$  的线性方程组求值。

由于装配式组合梁有剪力连接区和无剪力连接区段较多, 人工求解复杂, 可采用编程进行快速求解矩阵系数。

## 2 滑移理论计算方法的验证

### 2.1 与已有连续剪力连接的常规组合梁理论对比

当无剪力连接区长度  $l_2$  设为 0 时, 式(19)和式(24)即可用于分析连续均匀剪力键分布的常规组合梁, 将其与现有权威连续剪力连接的组合梁滑移表达式进行对比, 验证其可靠性。

在集中荷载  $P$  作用下, 将边界条件  $S(0) = 0, S(-L/2) = 0$  代入式(19)求解, 得到集中荷载  $P$  作用下现浇组合梁滑移计算公式为:

$$S(x) = \frac{\beta P(1 + e^{-al} - e^{ax-al} - e^{-ax})}{2(1 + e^{-al})} \quad (25)$$

式(25)与聂建国<sup>[9]</sup>提出的组合梁滑移分布计算公式完全一致, 表明本文算法兼容连续剪力连接的均布剪力键组合梁以及间断剪力连接的预制-装配式组合梁的界面滑移分布计算。

### 2.2 与装配式组合梁试验实测结果对比

为进一步验证, 开展了一组装配式组合梁加载试验, 将实测滑移及应力等与理论结果对比。试验梁长  $L = 2000 \text{ mm}$ , 混凝土和钢材的弹性模量分别为  $E_c = 3.518 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,  $E_s = 2.04 \times 10^5 \text{ MPa}$ , 采用跨中单点加载, 集中荷载  $P = 80 \text{ kN}$ , 试验梁构造及测点布置如图 5 和图 6 所示。

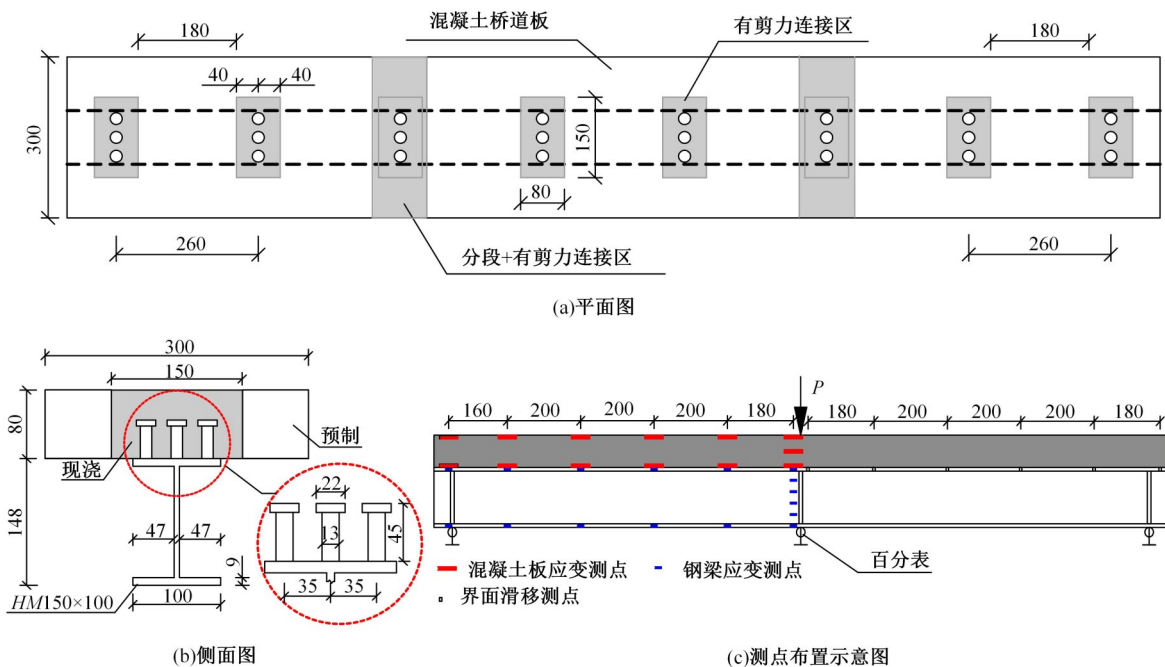


图 5 试验梁构造图及测点布置

Fig. 5 Test beam structure drawing and measuring point layout



图 6 试验梁试件

Fig. 6 Specimen of test beam

图 7 为试验梁滑移计算结果与实测结果对比,结果表明:滑移计算结果与实测结果基本吻合,发展趋势也大致相同;滑移跨中小、端部大,沿组合梁纵向呈非线性变化,基本与剪力分布类似。无剪力连接区没有布置剪力键,界面抗滑移能力较弱,因此滑移在此区段出现局部峰值。

图 8 为试验梁混凝土下翼缘、钢梁上翼缘应

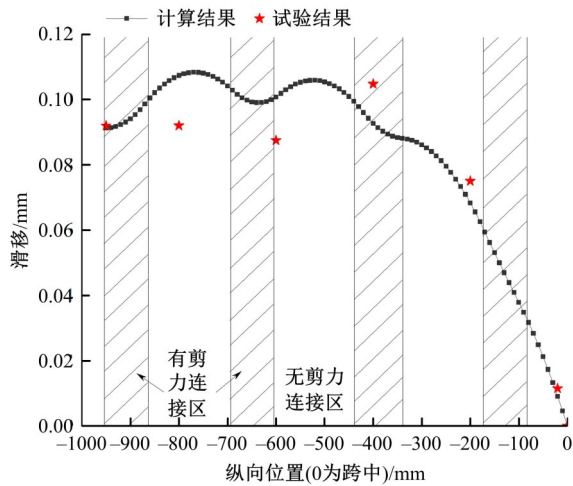


图 7 滑移分布理论计算与实测结果对比

Fig. 7 Slip comparison of calculated and measured

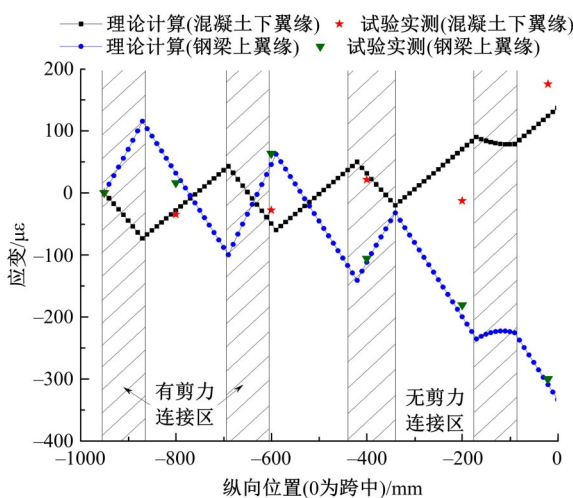


图 8 混凝土板下缘、钢梁上缘应变沿梁长分布对比

Fig. 8 Calculated and measured strain of the bottom of the concrete slab and the top of the steel beam

变沿梁长分布理论与实测结果的对比,可以看出,混凝土板下翼缘、钢梁上翼缘应变呈折线状分布,明显受间断剪力连接影响。试验梁混凝土板与钢梁应变分布理论计算结果与实测结果基本一致。

### 3 参数分析

基于前文的理论,研究混凝土板与钢梁高度比  $h_c/h_s$ 、抗剪连接度  $n/n_t$  以及集束度  $\gamma_1$  三个构造参数对装配式组合梁滑移和变形的影响。抗剪连接度设置 6 组参数,分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.2、2.0,其他参数分别如表 1 和表 2 所示。集束度定义为单个(排)键群内剪力键数量与全梁剪力键数量的比值。

表 1 高度比

Table 1 Height ratio

序号	混凝土板厚度/mm	钢梁高度/mm	高度比
1	50	2238	0.022
2	150	2238	0.067
3	250	2238	0.112
4	350	2238	0.156
5	400	2238	0.179
6	500	2238	0.223

表 2 集束度

Table 2 Clustering degree

序号	预留孔数量	单孔剪力键数量	剪力键总数	集束度
1	20	24	480	0.050
2	12	40	480	0.083
3	8	60	480	0.125
4	5	96	480	0.200
5	3	160	480	0.333

图 9 给出了混凝土板与钢梁的高度比、抗剪连接度以及集束度 3 个参数分别对装配式组合梁滑移的影响。由图 9 可知:高度比越大,界面滑移越大;不同高度比组合梁界面滑移沿梁长分布规律大致相同(见图 9(a));抗剪连接度越大,界面滑移越小(见图 9(b));随着集束度的增大,界面滑移量增大,且显著影响滑移分布;集束度越大,滑移分布越不均匀,在无剪力连接区出现峰值(见图 9(c))。

图 10 给出了混凝土板与钢梁的高度比、抗剪连接度以及集束度 3 个参数分别对装配式组合梁挠度的影响。由图 10 可知:随着高度比和抗剪连接度的增大,挠度减小,且高度比和抗剪连接度越大,组合梁的抗弯刚度越接近没有界面滑移的组合梁抗弯刚度;在二者足够大以后,高度比和抗剪

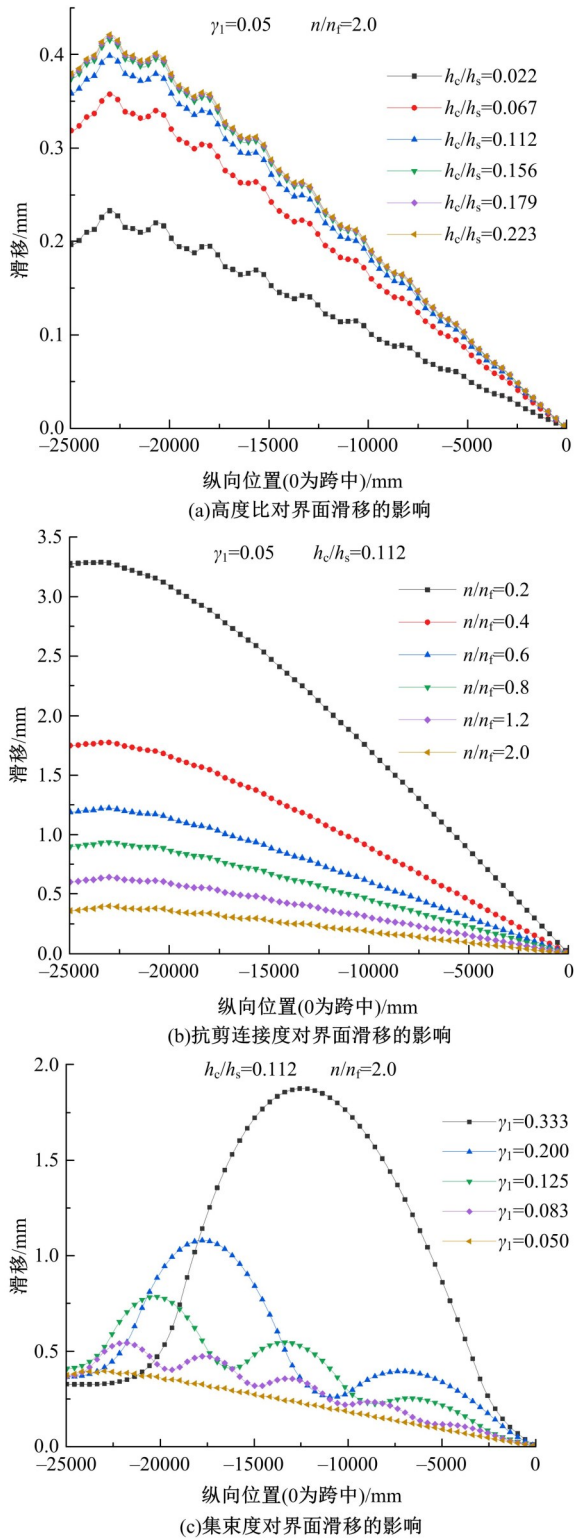


图 9 界面滑移分布曲线

Fig. 9 Interface slip distribution curve

连接度的变化对组合梁抗弯刚度的变化影响减小,后期曲线趋向平稳。随着集束度的增大,挠度增大、剪力键群间距增大、无剪力连接区的滑移增加,因此抗弯刚度的削弱随着集束度的增大而愈加显著。

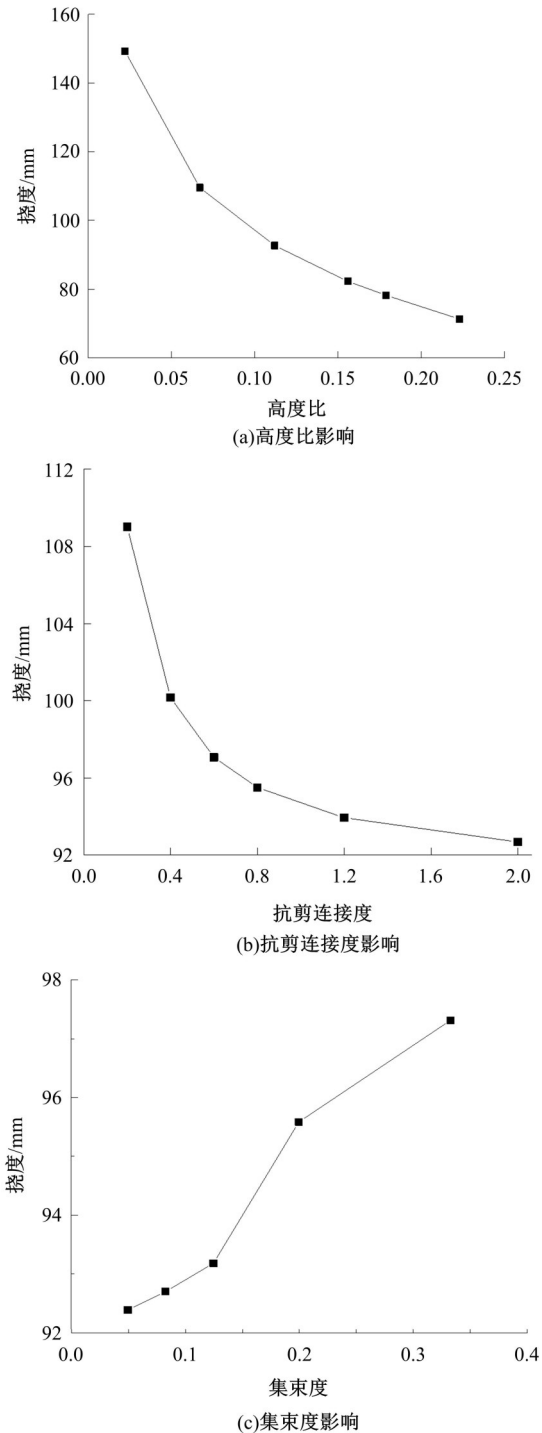


图 10 各参数对跨中挠度的影响

Fig. 10 Influence of different parameters on the mid-span deflection

## 4 结 论

(1) 针对非连续界面剪力连接下的装配式组合梁界面滑移计算理论,将组合梁分为有剪力连接区和无剪力连接区,并分别建立界面滑移方程,采用位移连续和变形协调条件建立约束方程,建

立并求解出集中荷载和均布荷载作用下的界面滑移分布解析表达式。

(2)当无剪力连接区长度取为0时,本文算法与现有假定界面剪力连接均布的权威组合梁界面滑移理论公式一致。

(3)装配式组合梁的非连续界面滑移分布理论计算的滑移分布和应变结果与试验结果吻合较好。

(4)采用本文算法对装配式组合梁滑移和变形进行了混凝土板与钢梁的高度比、抗剪连接度以及集束度的参数分析。结果表明,界面滑移随抗剪连接度的增大而减小,随高度比和集束度的增大而增大。集束度越大,滑移分布越不均匀,在无剪力连接区出现峰值。

#### 参考文献:

- [1] 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.  
Xiao Hui, Li Ai-qun, Chen Li-hua, et al. Development, research and application of steel and concrete composite beam [J]. Special Structures, 2005, 22(1): 38-41.
- [2] 聂建国, 陶慕轩, 吴丽丽, 等. 钢-混凝土组合结构桥梁研究新进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 110-122.  
Nie Jian-guo, Tao Mu-xuan, Wu Li-li, et al. Advances of research on steel-concrete composite bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 110-122.
- [3] 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(1): 31-36.  
Nie Jian-guo, Shen Ju-min. Slip effect on strength of composite steel-concrete beams[J]. China Civil Engineering Journal, 1997(1): 31-36.
- [4] Johnson R P. Composite Structures of Steel and Concrete, vol 1: Beams, Columns, Frames and Applications in Buildings[M]. 3rd ed. Oxford: Blackwell Scientific, 2004.
- [5] Johnson R P, Molenstra N. Partial shear connection in composite beams for buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1991, 91(4): 679-704.
- [6] 范亮, 谭阳, 李成君, 等. 装配式群钉组合梁与现浇组合梁对比试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6): 59-67.  
Fan Liang, Tan Yang, Li Cheng-jun, et al. Comparative experimental study on fabricated group nail composite beam and cast-in-situ composite beam[J]. Highway Transportation Technology, 2020, 37(6): 59-67.
- [7] Newmark N M, Siess C P, Viest I M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction[J]. Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, 1951, 9(1): 75-92.
- [8] 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. Theoretical calculation of slip and deformation of steel-concrete composite beams under uniformly distributed loads[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(2): 133-137.
- [9] 聂建国. 钢-混凝土组合结构: 试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [10] 周世军, 江瑶, 吴云丹, 等. 考虑滑移和剪切变形的单箱双室组合箱梁剪力滞效应[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 20-27.  
Zhou Shi-jun, Jiang Yao, Wu Yun-dan, et al. Shear lag effect of twin-cell composite beams considering slip and shear deformation[J]. Civil Construction and Environmental Engineering, 2017, 39(3): 20-27.
- [11] 项贻强, 何超超, 邱政. 体外预应力钢-混凝土组合梁长期滑移计算[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2017, 51(4): 739-744.  
Xiang Yi-qiang, He Chao-chao, Qiu Zheng. Calculation of long-term slippage for externally prestressing steel-concrete composite beam[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2017, 51(4): 739-744.
- [12] 郑则群, 房贞政, 宗周红. 预应力钢-混凝土组合梁非线性有限元解法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 218-222.  
Zheng Ze-qun, Fang Zhen-zheng, Zong Zhou-hong. Finite element nonlinear method of prestressed steel-concrete composite beams[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(2): 218-222.
- [13] Gara F, Ranzi G, Leoni G. Short-and long-term analytical solutions for composite beams with partial interaction and shear-lag effects[J]. International Journal of Steel Structures, 2010, 10(4): 359-372.
- [14] Angelo M T, Luigino D. Creep effects in composite beams with flexible shear connectors[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(8): 2063-2080.
- [15] Nie J G, Cai C S, Zhou T R, et al. Experimental and analytical study of prestressed steel-concrete composite beams considering slip effect[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(4): 530-540.