

文章编号:1673-9469(2025)05-0001-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.05.001

## 集中荷载下矩形管翼缘组合梁侧扭屈曲研究

刘迎春<sup>1,2</sup>, 胡志峰<sup>1</sup>, 计静<sup>1,2\*</sup>, 张文福<sup>3</sup>, 姜良芹<sup>1,2</sup>

(1. 东北石油大学 黑龙江省高校防灾减灾工程与防护工程重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 东北石油大学 黑龙江省寒区新能源热利用及防灾减灾重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

3. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 为研究集中荷载下跨中设置扭转支撑矩形管翼缘组合梁的稳定性能, 采用“板-梁理论”, 建立了矩形管翼缘组合梁的弹性侧扭屈曲总势能方程, 选取位移函数, 运用能量变分法求解其屈曲方程, 得到了矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩解析解。采用1stOpt软件, 考虑多参数的影响, 对不同截面尺寸、跨度、扭转支撑刚度下组合梁的弹性侧扭屈曲临界弯矩进行拟合, 获得有无扭转支撑的组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的计算公式, 并与有限元分析结果进行对比, 相对误差在5%以内, 验证了计算公式的精确性。最后, 分析混凝土强度、腹板高厚比、跨高比和上翼缘含钢率等参数对矩形管翼缘组合梁稳定性能的影响规律。研究发现, 随着扭转支撑刚度的增加, 组合梁的弹性侧扭屈曲临界弯矩逐渐增大, 梁的稳定性得到提高; 当扭转支撑刚度达到门槛刚度时, 组合梁的弹性侧扭屈曲临界弯矩不再提高; 改变混凝土强度或腹板高厚比不会使梁的弹性侧扭屈曲临界弯矩产生明显变化, 而减小跨高比或提高上翼缘含钢率会明显增加该类组合梁的弹性侧扭屈曲临界弯矩。

**关键词:** 矩形管翼缘组合梁; 扭转支撑; 侧扭屈曲; 能量变分法

**中图分类号:** TU398.9

**文献标识码:** A

## Research on Lateral-torsional Buckling of Rectangular Tubular Flange Composite Beams Under Concentrated Loads

LIU Yingchun<sup>1,2</sup>, HU Zhifeng<sup>1</sup>, JI Jing<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Wenfu<sup>3</sup>, JIANG Liangqin<sup>1,2</sup>

(1. Heilongjiang Key Lab of Disaster Prevention Mitigation and Protection Engineering, Northeast Petroleum University,

Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Thermal Utilization and Disaster

Reduction of New Energy in Cold Regions, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

3. School of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

**Abstract:** To study the stability performance of rectangular tubular flange composite beams with torsional bracing set at the mid-span under concentrated loads, the “plate-beam theory” was adopted, and the elastic lateral-torsional buckling total potential energy equation of the rectangular tubular flange composite beam was established. The displacement functions were selected, and the energy variation method was used to solve the buckling equation, and the analytical solution for the elastic lateral-torsional buckling critical moment of the rectangular tubular flange composite beam was obtained. Then, using the 1stOpt software, considering the influence of multiple parameters, the elastic critical moments of the composite beams under different cross-sectional dimensions, spans, and torsional bracing stiffness were fitted, and the calculation formulas for the elastic critical moments of the composite beams with and without torsional bracing were obtained. These formulas were compared with the finite element analysis results, and the error was

收稿日期:2024-05-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178143,51578120);黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2020E018)

第一作者:刘迎春(1980—),女,安徽涡阳人,博士,副教授,主要从事钢结构稳定方面的研究。

\*通信作者:计静(1975—),男,黑龙江五常人,博士,教授,主要从事新型组合结构抗震方面的研究。

within 5%, verifying the accuracy of the calculation formulas. Finally, the influence laws of parameters such as concrete strength, web height-thickness ratio, span-height ratio, and upper flange steel content ratio on the stability performance of the rectangular tubular flange composite beam were analyzed. The study found that as the torsional bracing stiffness increased, the elastic lateral-torsional buckling critical moment of the composite beam gradually increased, and the stability of the beam was improved; when the torsional bracing stiffness reached the threshold stiffness, the elastic lateral-torsional buckling critical moment of the composite beam no longer increased; changing the concrete strength or web height-thickness ratio would not cause significant changes in the elastic lateral-torsional buckling critical moment of the beam, while reducing the span-height ratio or increasing the upper flange steel content ratio would significantly increase the elastic lateral-torsional buckling critical moment of this type of composite beam.

**Key words:** rectangular tubular flange composite beam; torsional bracing; lateral-torsional buckling; energy variational method

随着建筑结构的发展,大跨度桥梁、超高层建筑日益增多,钢管混凝土组合结构逐渐在工程中得到应用<sup>[1-2]</sup>。2005年, Kim等<sup>[3]</sup>提出一种新型的管翼缘组合梁,该组合梁用钢管混凝土替代工字形钢梁的翼缘钢板,与平板翼缘工字形梁相比,其强度、刚度和稳定性均得到显著提高<sup>[4-7]</sup>。

近年来,管翼缘组合梁的抗弯性能和稳定性受到广泛关注。Sause<sup>[8]</sup>通过开展试验和有限元分析,结合工程实际,对上下翼缘为矩形的管翼缘组合梁侧扭屈曲进行研究,并阐述了组合梁相较于传统工字形梁的优势。Rana等<sup>[9]</sup>通过有限元模拟研究了上翼缘为圆形的管翼缘组合梁在弯曲和拉伸轴向力共同作用下的力学性能,提出了组合梁基于设计的简化计算公式,研究结果揭示了弯矩-轴力相互作用关系。Ji等<sup>[10]</sup>利用有限元软件研究了上下矩形翼缘的圆孔蜂窝腹板管翼缘组合梁受弯性能,基于统一强度理论建立了极限弯矩预测公式。Gao等<sup>[11]</sup>通过试验和数值模拟,研究了上翼缘为矩形高强混凝土管翼缘组合梁的侧扭屈曲行为,研究表明,填充混凝土可显著提高翼缘抗变形能力,且翼缘高度对侧扭屈曲强度影响显著。任亚文等<sup>[12-15]</sup>通过试验和理论研究,给出4种单轴对称管翼缘组合梁的弹塑性抗弯承载力计算公式,并基于板梁理论推导出侧扭屈曲临界矩的计算公式。在实际工程中,管翼缘组合梁之间常用钢梁连接,这些钢梁可看作支撑,能够提高整体结构的承载能力<sup>[16]</sup>。目前,针对支撑和钢梁的共同作用问题,国内外专家学者开展了大量的研究。Zhang等<sup>[17-18]</sup>对带侧向支撑的工字形悬臂钢梁和简支梁进行弹性侧扭屈曲分析,给出弹性临界弯矩的计算公式;Belaid等<sup>[19]</sup>研究了3种荷载位置下侧向支撑刚度对临界弯矩的影响,提出具有连续侧向支撑的简支梁临界

弯矩公式;曹宇翔等<sup>[20]</sup>利用有限元软件研究了侧向支撑刚度和支撑间距对蜂窝钢梁稳定性的影响,给出带支撑和无支撑蜂窝钢梁的临界弯矩计算公式。

目前,针对传统工字形钢梁与支撑的共同作用问题已有较多研究,而对于本文提到的管翼缘组合梁和其支撑的共同作用问题,相关研究相对较少,因此,研究带扭转支撑的矩形管翼缘组合梁的稳定性能具有重要意义。本文采用理论分析和数值模拟相结合的方法,对集中荷载下管翼缘组合梁的弹性侧扭屈曲进行研究,回归出临界弯矩的计算公式。基于该公式,讨论了管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的影响因素,研究成果可为其在工程中的应用提供参考。

## 1 能量变分法

### 1.1 基本资料

集中荷载作用下的带扭转支撑的矩形管翼缘组合梁(Rectangular Tubular Flange Composite Beam, RTFCB)计算简图如图1所示,图中, $L$ 为梁的跨长, $m$ ;  $h$ 为上下翼缘形心距, $m$ ;  $P_y$ 为作用在跨中上翼缘的集中荷载, $kN$ ;在梁跨中截面剪心处布置一道扭转支撑, $R$ 为扭转支撑刚度, $kN/rad$ 。

矩形管翼缘组合梁截面示意图如图2(a)所示,其中, $b_{t1}$ 、 $t_{t1}$ 、 $t$ 分别为上翼缘钢管宽度、高度、厚度, $m$ ;  $b_{t2}$ 、 $t_{t2}$ 分别为下翼缘钢板宽度和厚度, $m$ ;  $h_w$ 、 $t_w$ 分别为腹板高度和厚度, $m$ ;  $H$ 为截面高度, $m$ ;  $O$ 、 $S$ 分别为截面形心和剪心;  $h_{s1}$ 、 $h_{s2}$ 分别为上下翼缘形心到 $S$ 的距离, $m$ ;  $e_0$ 为上翼缘形心到 $O$ 的距离, $m$ 。矩形管翼缘组合梁侧扭屈曲变形如图2(b)所示,其中, $a$ 为剪心 $S$ 到荷载作用位置的距离, $m$ ;  $u$ 为剪心的侧向位移, $m$ ;  $\theta$ 为截面绕剪心的转角, $rad$ 。

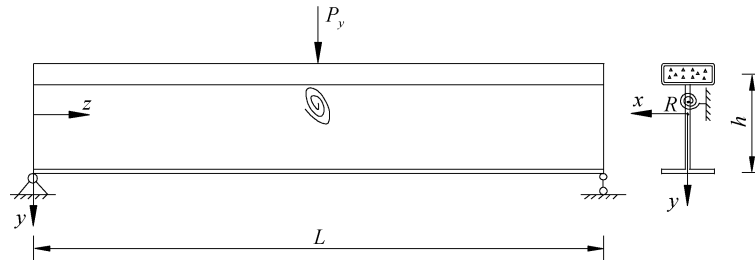


图 1 矩形管翼缘组合梁计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of rectangular tubular flange composite beam

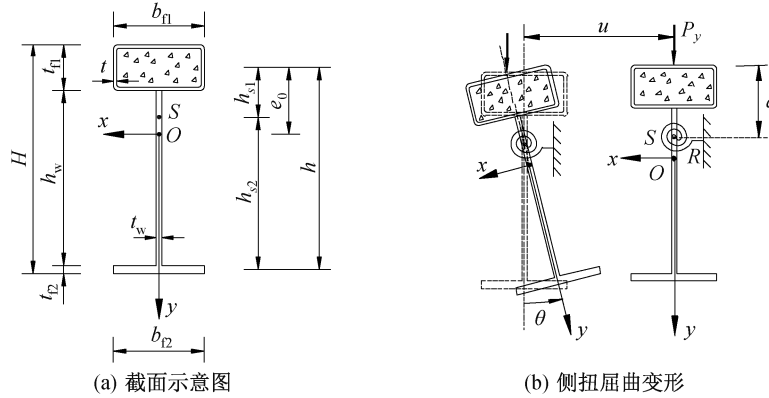


图 2 矩形管翼缘组合梁截面与侧扭屈曲变形图示

Fig. 2 Diagram of cross-section and lateral-torsional buckling deformation of rectangular tubular flange composite beam

1.2 基本假设

本文在计算矩形管翼缘组合梁的侧扭屈曲时,采用如下假设<sup>[15]</sup>:(1)刚周边假设,梁侧向弯曲和扭转时,其截面形状不变;(2)平面外变形的应变能,上翼缘通过 Saint-Venant 扭转力学模型确定,腹板和下翼缘通过 Kirchhoff 板力学模型确定;(3)平面内变形的应变能均通过 Euler 梁力学模型确定;(4)钢管与混凝土之间不发生相对滑移。

1.3 总势能方程

集中荷载下,无支撑时矩形管翼缘组合梁的总势能  $\Pi_1$  可表达为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & \frac{1}{2} \int_0^L [ (EI_y)_{comp} u''^2 + (EI_\omega)_{comp} \theta''^2 + \\ & ((GJ_k)_{comp} + 2M_x \beta_x) \theta'^2 + 2M_x u'' \theta ] dz - \\ & \frac{1}{2} P_y a \left[ \theta \left( \frac{L}{2} \right) \right]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $(EI_y)_{comp}$  为梁绕 y 轴抗弯刚度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ;  $(EI_\omega)_{comp}$  为翘曲扭转刚度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^4$ ;  $(GJ_k)_{comp}$  为自由扭转刚度,  $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ ;  $M_x$  为弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $\beta_x$  为截面不对称系数;  $u''$  为侧向位移  $u$  的二阶导数,  $\text{m}^{-1}$ ;  $\theta'$  为截面扭转角的一阶导数,  $\text{rad/m}$ ;  $\theta''$  为截

面扭转角的二阶导数,  $\text{rad/m}^2$ 。关于矩形管翼缘组合梁截面  $(EI_y)_{comp}$ 、 $(EI_\omega)_{comp}$ 、 $\beta_x$ 、 $(GJ_k)_{comp}$  的计算公式,参见文献<sup>[15]</sup>。

扭转支撑的总势能  $\Pi_2$  表示为<sup>[18]</sup>

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} R \left[ \theta \left( \frac{L}{2} \right) \right]^2 \quad (2)$$

1.4 模态试函数

截面位移  $u(z)$  和转角  $\theta(z)$  可表示为

$$\begin{cases} u(z) = \sum_{i=1}^{12} A_i h \sin\left(\frac{i\pi z}{L}\right) \\ \theta(z) = \sum_{i=1}^{12} B_i \sin\left(\frac{i\pi z}{L}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $A_i$ 、 $B_i$  为待定系数。

几何边界条件可表示为

$$\begin{aligned} u(0) = u(L) = 0; \quad u''(0) = u''(L) = 0 \\ \theta(0) = \theta(L) = 0; \quad \theta''(0) = \theta''(L) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

1.5 弯矩表达式

跨中集中荷载下弯矩  $M_x$  可表示为

$$\begin{cases} M_{x1} = \frac{1}{2} P_y z & 0 \leq z \leq \frac{L}{2} \\ M_{x2} = \frac{1}{2} P_y (L - z) & \frac{L}{2} < z \leq L \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $M_{x1}$  和  $M_{x2}$  分别为矩形管翼缘组合梁  $0 \sim L/2$  和  $L/2 \sim L$  位置处的弯矩。

将式(3)一式(5)代入式(1),无支撑时总势能  $\Pi_1$  可表示为

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & \frac{\pi^4 h^2 (EI_y)_{\text{comp}}}{4L^3} \sum_{i=1}^{12} i^4 A_i^2 + \frac{\pi^4 (EI_\omega)_{\text{comp}}}{4L^3} \sum_{i=1}^{12} i^4 B_i^2 + \\ & \frac{\pi^2 (GJ_k)_{\text{comp}}}{4L} \sum_{i=1}^{12} i^2 B_i^2 + \int_0^{L/2} M_{x1} \beta_x \theta'^2 dz + \\ & \int_{L/2}^L M_{x2} \beta_x \theta'^2 dz + \int_0^{L/2} M_{x1} u'' \theta dz + \int_{L/2}^L M_{x2} u'' \theta dz - \\ & \frac{1}{2} (B_1 - B_3 + B_5 - B_7 + B_9 - B_{11})^2 P_y a \quad (6) \end{aligned}$$

将式(3)代入式(2),支撑势能可表示为

$$\Pi_2 = \frac{1}{2} R (B_1 - B_3 + B_5 - B_7 + B_9 - B_{11})^2 \quad (7)$$

因此,矩形管翼缘组合梁的总势能  $\Pi$  表达式表示为

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_2 \quad (8)$$

### 1.6 无量纲屈曲方程

根据势能驻值原理<sup>[13]</sup>,有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial A_i} = 0 (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) \\ \frac{\partial \Pi}{\partial B_i} = 0 (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) \end{cases} \quad (9)$$

引入无量纲参数可得:

$$\begin{cases} \tilde{M}_{cr} = \frac{M_{cr}}{\left[ \frac{\pi^2 (EI_y)_{\text{comp}}}{L^2} \right] h}; \tilde{\beta}_x = \frac{\beta_x}{h}; \tilde{a} = \frac{a}{h}; P_y = \frac{4M_{cr}}{L} \\ K = \sqrt{\frac{\pi^2 (EI_\omega)_{\text{comp}}}{(GJ_k)_{\text{comp}} L^2}}; S = \frac{(EI_y)_{\text{comp}} h^2}{(EI_\omega)_{\text{comp}}}; \tilde{R} = \frac{\pi R L^3}{(EI_y)_{\text{comp}} h^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $M_{cr}$  为组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩,  $\text{kN} \cdot \text{m}$ ;  $\tilde{M}_{cr}$ 、 $\tilde{\beta}_x$ 、 $\tilde{a}$ 、 $\tilde{R}$  分别为无量纲的  $M_{cr}$ 、 $\beta_x$ 、 $a$ 、 $R$ ;  $K$  为扭转刚度参数;  $S$  为引入表示  $EI_y$  与  $EI_\omega$  关系的参数。

将式(9)乘以  $\frac{L^3}{(EI_y)_{\text{comp}} h^2}$ ,再将式(10)代入式(9),则可得无量纲屈曲方程,并以分块矩阵形式表示,见式(11)。

$$\begin{bmatrix} {}^0 R & {}^0 S \\ {}^0 T & {}^0 Q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} = \tilde{M}_{cr} \begin{bmatrix} {}^1 R & {}^1 S \\ {}^1 T & {}^1 Q \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ B \end{Bmatrix} \quad (11)$$

由式(11)即可求得无量纲临界弯矩  $\tilde{M}_{cr}$ 。

通过上述推导发现,无量纲临界弯矩  $\tilde{M}_{cr}$  的值随参数  $\tilde{a}$ 、 $S$ 、 $\tilde{\beta}_x$ 、 $\tilde{R}$ 、 $K$  变化,不同截面尺寸、跨度、支撑刚度的梁  $\tilde{a}$ 、 $S$ 、 $\tilde{\beta}_x$ 、 $\tilde{R}$ 、 $K$  不同。因此,可获得大量的  $\tilde{M}_{cr}$ ,用于回归无量纲临界弯矩公式。

## 2 无量纲临界弯矩公式

本文选出 500 组不同截面尺寸和跨度的矩形管翼缘组合梁,利用 MATLAB 软件编写  $\tilde{M}_{cr}$  的计算程序。通过计算发现,当  $\tilde{R}$  到达门槛刚度  $\tilde{R}_T$  时,  $\tilde{M}_{cr}$  值不再增大。 $\tilde{M}_{cr}$  变化曲线如图 3 所示,图中  $\tilde{M}_{cr0}$  和  $\tilde{M}_{crT}$  分别对应  $\tilde{R} = 0$  和  $\tilde{R} = \tilde{R}_T$  时的矩形管翼缘组合梁无量纲临界弯矩。经试算后,将  $\tilde{R}$  的跨度取 200,计算得到 120 000 多组数据。

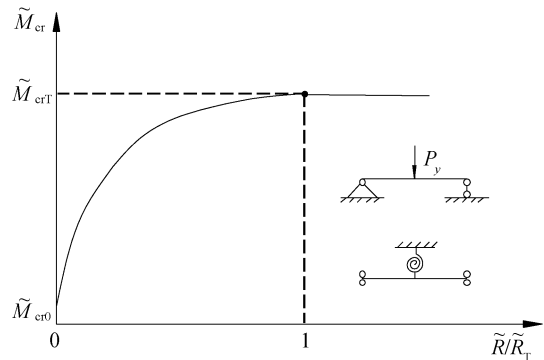


图 3 无量纲临界弯矩变化曲线

Fig. 3 Variation curve of dimensionless critical moments

无支撑矩形管翼缘组合梁无量纲临界弯矩  $\tilde{M}_{cr0}$  的计算公式为<sup>[15]</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{cr0} = & \frac{2\pi^2}{(4 + \pi^2)} \left[ -\frac{8}{4 + \pi^2} \tilde{a} + \frac{\pi^2 - 4}{4 + \pi^2} \tilde{\beta}_x + \right. \\ & \left. \sqrt{\left( -\frac{8}{4 + \pi^2} \tilde{a} + \frac{\pi^2 - 4}{4 + \pi^2} \tilde{\beta}_x \right)^2 + S^{-1} (1 + K^{-2})} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

将数据导入 1stOpt 软件进行回归,支撑刚度达到  $\tilde{R}_T$  时,对应的无量纲临界弯矩  $\tilde{M}_{crT}$  的计算公式为

$$\begin{aligned} \tilde{M}_{crT} = & 2\beta_{1T} \left[ \beta_{2T} \tilde{a} + \beta_{3T} \tilde{\beta}_x + \right. \\ & \left. \sqrt{(\beta_{2T} \tilde{a} + \beta_{3T} \tilde{\beta}_x)^2 + S^{-1} (1 + \frac{1}{4} K^{-2})} \right] \quad (13) \end{aligned}$$

式中:  $\beta_{iT}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为待拟合参数。

无量纲门槛刚度  $\tilde{R}_T$  的计算公式为

$$\tilde{R}_T = \frac{2\pi(8 + \alpha_1) \sqrt{4 + \alpha_2}}{\alpha_3} \quad (14)$$

式中:  $\alpha_i (i = 1, 2, 3)$  为与  $K$  和  $S$  有关的变量。

$$\begin{cases} \alpha_1 = \gamma_1 K^{-4} + \gamma_2 K^{-1} S^{-1} + \tilde{\beta}_x (\gamma_3 S + \gamma_4 K^{-2}) \\ \alpha_2 = m_1 K^{-4} + m_2 K^{-1} S^{-1} + \tilde{\beta}_x (m_3 S + m_4 K^{-2}) \\ \alpha_3 = n_1 K^{-4} + n_2 K^{-1} S^{-1} + n_3 \tilde{\beta}_x S \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\gamma_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 、 $m_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 、 $n_i (i = 1, 2, 3)$  为待拟合参数。

有支撑时无量纲临界弯矩计算公式为

$$\tilde{M}_{cr} = c_1 \tilde{M}_{cr0} + c_2 (\tilde{M}_{crT} - \tilde{M}_{cr0}) \left( \frac{\tilde{R}}{\tilde{R}_T} \right)^{0.66} \times \left[ 1 + c_3 \left( \frac{\tilde{R}}{\tilde{R}_T} \right) + c_4 \left( \frac{\tilde{R}}{\tilde{R}_T} \right)^2 \right] + c_5 (0 < \tilde{R} < \tilde{R}_T) \quad (16)$$

式中:  $c_i (i = 1, 2, 3, 4, 5)$  为待拟合参数。

以上各式的参数取值见表 1。

### 3 理论验证

#### 3.1 有限元模型的建立

利用 ANSYS 软件和文献 [15] 中建模方法,将

矩形管翼缘组合梁分为上翼缘钢管、腹板、下翼缘钢板、混凝土 4 个部分。钢材采用 SHELL181 单元模拟,混凝土采用 SOLID65 单元模拟。两种材料之间通过使用接触单元覆盖在材料的表面,建立接触对,实现面面接触。在梁的跨中和两端各设置一道加劲肋,用 CERIG 命令沿梁长建立绕  $z$  轴约束方程。在两端支座处,截面上各节点设置  $x$ 、 $y$  向的位移约束和绕  $z$  向的转动约束;对于其中一端支座,在截面形心点处设置  $z$  向位移约束<sup>[21]</sup>。采用弹簧单元 COMBIN14 模拟跨中扭转支撑<sup>[18]</sup>。本文建立的有限元模型如图 4 所示。

#### 3.2 验证有限元模型正确性

本文通过对比文献 [22] 中 C250L3S 矩形管翼缘组合梁的整体稳定性能试验结果,验证模型的正确性,试验梁几何尺寸见表 2。依据上述建模方法建立有限元模型。参考国内钢管混凝土结构的研究<sup>[23-27]</sup>,钢材和混凝土的本构关系选取韩林海等给出的应力-应变关系<sup>[23-24]</sup>。文献 [22] 中试验的临界荷载  $P_{cr1}$  为 73.11 kN,通过弹塑性侧扭屈曲分析,得到矩形管翼缘组合梁的有限元临界荷载  $P_{cr2}$  为 74.58 kN,  $P_{cr2}/P_{cr1}$  为 1.02。矩形管翼缘组合梁荷载-竖向位移变化曲线如图 5 所示。

表 1 公式参数取值

Tab. 1 Parameter values of the formula

公式	参数	取值	公式	参数	取值	公式	参数	取值
公式 (13)	$\beta_{1T}$	3.563	公式 (13)	$\beta_{2T}$	0.041	公式 (13)	$\beta_{3T}$	1.037
公式 (15)	$\gamma_1$	-0.006	公式 (15)	$m_1$	$2.600 \times 10^{-4}$	公式 (15)	$n_1$	$-6.040 \times 10^{-6}$
	$\gamma_2$	-41.822		$m_2$	7 247.332		$n_2$	0.782
	$\gamma_3$	227.079		$m_3$	13 013.784		$n_3$	52.297
	$\gamma_4$	162.476		$m_4$	-34.542			
公式 (16)	$c_1$	1.017	公式 (16)	$c_3$	-0.599	公式 (16)	$c_5$	-0.388
	$c_2$	1.788		$c_4$	0.183			

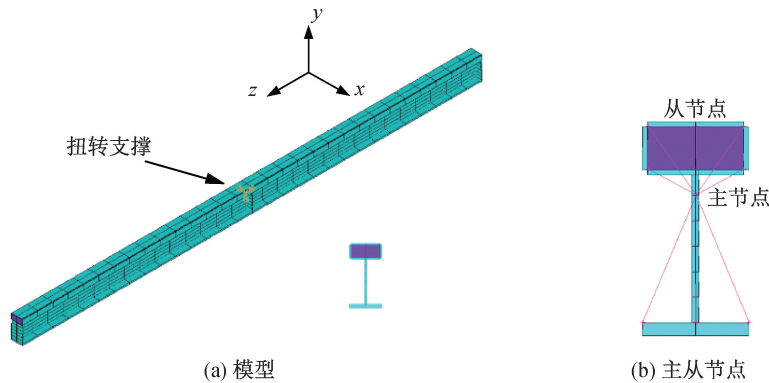


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

表 2 C250L3S 梁的几何尺寸

Tab. 2 Geometric dimensions of C250L3S beam

$b_{fl}/mm$	$t_{fl}/mm$	$t/mm$	$h_w/mm$	$t_w/mm$	$b_{r2}/mm$	$t_{r2}/mm$	$H/mm$	$L/m$
79.84	39.69	2.64	209.18	2.65	80.85	4.53	253.4	2.906

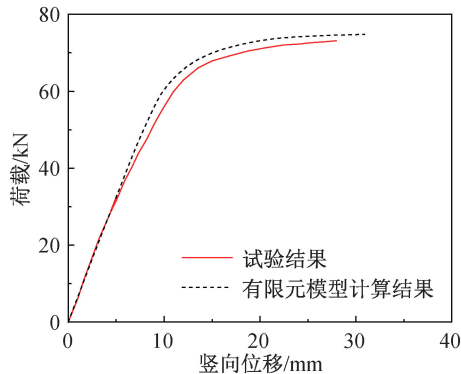


图 5 荷载-竖向位移曲线对比

Fig. 5 Comparison of load-vertical displacement curves

由图 5 可以看出,当荷载相同时,有限元模型计算的竖向位移和试验结果接近,误差很小,验证了有限元建模和分析方法的正确性。

### 3.3 结果验证

本文选取 6 种矩形管翼缘组合梁为研究对象,几何尺寸见表 3。组合梁所用钢材为 Q355,混凝土强度等级为 C40。将公式(16)的计算结果与 ANSYS 有限元分析结果进行对比,见图 6。

从图 6 可以看出,对于矩形管翼缘组合梁,有限元分析结果与公式(16)的计算结果接近,相对误差均小于 5%,说明公式(16)的精度较高,可依据该公式进行下一步的扩展参数分析。

## 4 参数分析

为探究矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的影响因素,本节选取表 3 中的 RTFCB-1、RTFCB-2 梁,依据公式(16)对混凝土强度、跨高比、上翼缘含钢率、腹板高厚比等参数进行分析,以获取其对临界弯矩的影响规律。

### 4.1 混凝土强度的影响

为分析混凝土强度对矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的影响,混凝土强度分别选用 C40、C50 和 C60,其他参数均不变。利用公式(16)计算不同混凝土强度下有支撑和无支撑组合梁的临界弯矩,见图 7。可以看出,当混凝土强度等级从 C40 变化到 C60 时,RTFCB-1 和 RTFCB-2 梁的临界弯矩仅增大 1%~3%,变化较小,说明混凝土强度对矩形管翼缘组合梁的稳定性影响甚微。

### 4.2 腹板高厚比的影响

为分析腹板高厚比对矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的影响,通过改变腹板厚度(RTFCB-1 腹板厚度分别取 4、6、8 mm; RTFCB-2 腹板厚度分别取 8、10、12 mm)来调整腹板高厚比,其他参数不变。利用公式(16)计算不同腹板高厚比下有支撑和无支撑组合梁临界弯矩,见图 8。可以看出,当腹板高厚比从 63.0 降低到 31.5 时,有支撑和无支撑的 RTFCB-1 梁的临界弯矩仅提高约 1%~3%;当腹板高厚比从 64.7 降低到 32.3 时,RTFCB-2 梁的临界弯矩仅提高约 1%,变化较小,说明腹板高厚比对矩形管翼缘组合梁的稳定性影响甚微。

### 4.3 跨高比的影响

为分析跨高比对矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的影响,改变梁跨度(RTFCB-1 跨度分别取 3、4、5、6 m; RTFCB-2 跨度分别取 5.2、7.8、10.4 m)来调整跨高比,其他参数均不变。利用公式(16)计算不同跨高比下有支撑和无支撑组合梁临界弯矩,见图 9。可以看出,当跨高比从 10 增加到 20 时,有支撑和无支撑的 RTFCB-1 梁的临界

表 3 几何尺寸

Tab. 3 Geometrical dimension

模型	$b_{fl}/mm$	$t_{fl}/mm$	$t/mm$	$h_w/mm$	$t_w/mm$	$b_{r2}/mm$	$t_{r2}/mm$	$H/mm$	$L/m$	$\tilde{R}_T$
RTFCB-1	80	40	4	252	8	80	8	300	3.00	10 257.72
RTFCB-2	200	120	8	388	12	200	12	520	10.40	60 156.29
RTFCB-3	120	60	5	380	10	120	10	450	6.75	20 593.52
RTFCB-4	220	110	8	378	12	220	12	500	10.00	45 538.20
RTFCB-5	250	150	12	537	13	250	13	700	10.50	39 450.96
RTFCB-6	300	150	10	436	14	300	14	600	15.00	76 190.62

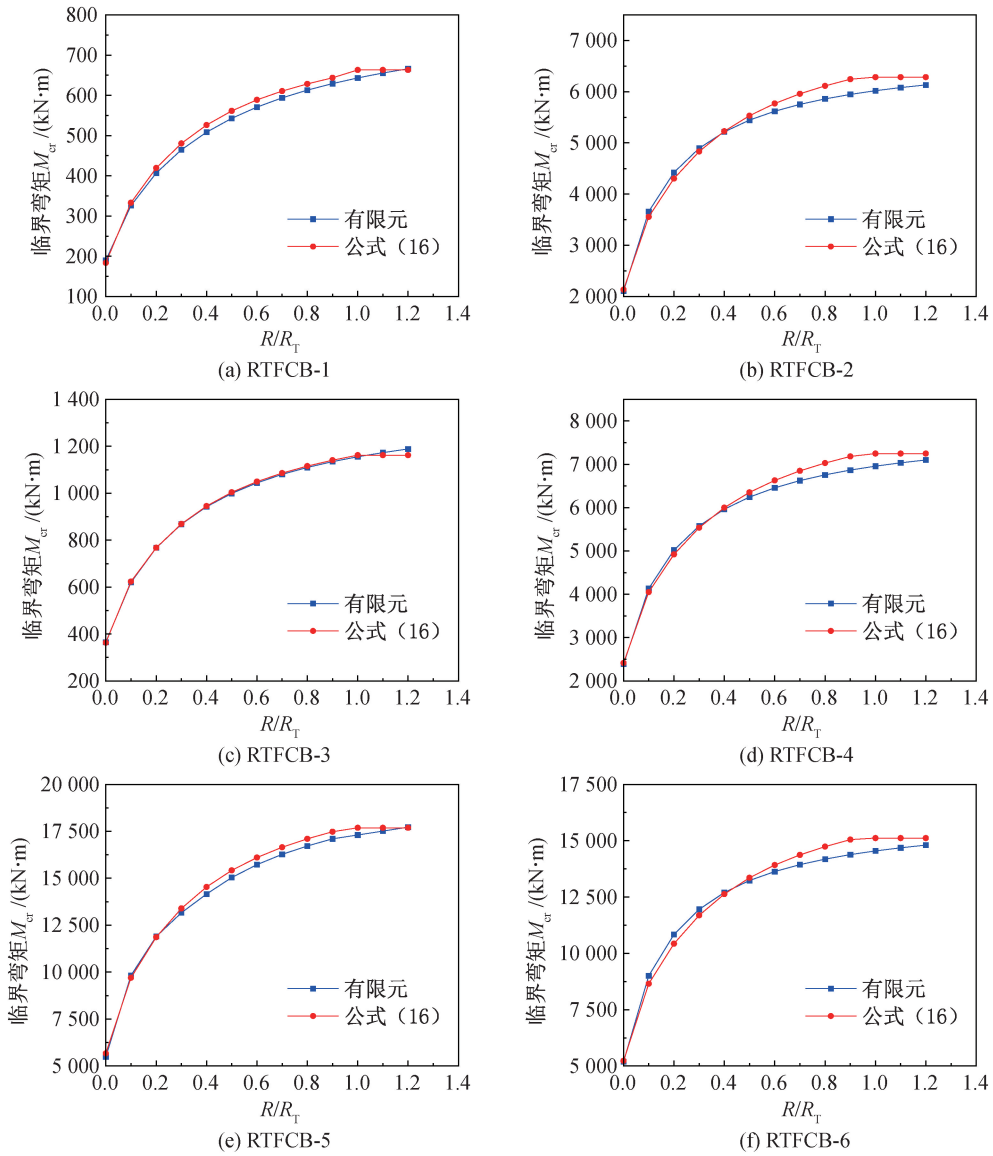


图 6 临界弯矩对比

Fig. 6 Comparison of critical moments

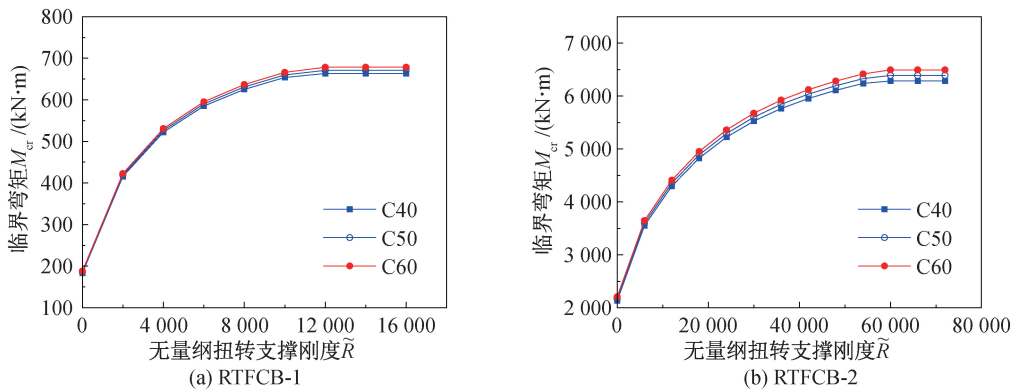


图 7 混凝土强度对临界弯矩的影响

Fig. 7 Influence of concrete strength on critical moments

弯矩减小约 33%~70%, RTFCB-2 梁的临界弯矩减小约 33%~65%, 变化很大。说明跨高比对梁的稳

定性影响很大, 是矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的主要影响因素。

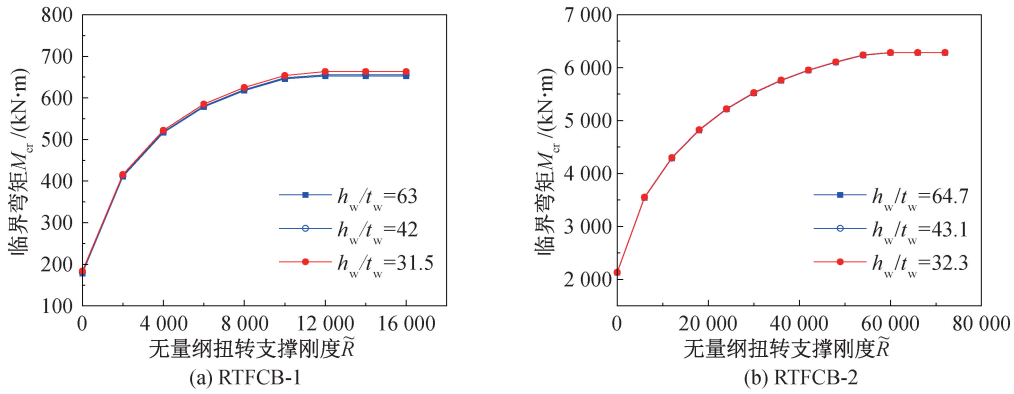


图 8 腹板高厚比对临界弯矩的影响

Fig. 8 Influence of height-thickness ratio on critical moments

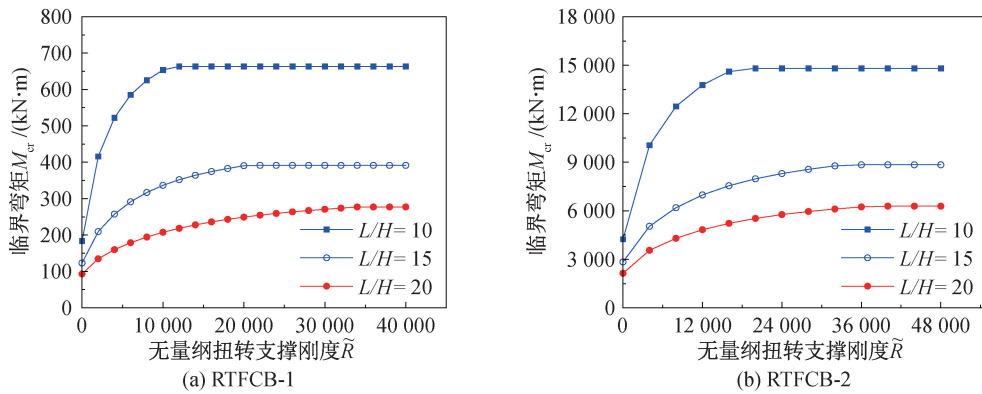


图 9 跨高比对临界弯矩的影响

Fig. 9 Influence of span-height ratio on critical moments

#### 4.4 上翼缘含钢率的影响

为分析上翼缘含钢率对矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的影响,改变上翼缘钢管厚度(RTFCB-1 钢管厚度分别取 4、5、6 mm;RTFCB-2 钢管厚度分别取 8、10、12 mm)来调整含钢率  $\alpha$ ,其他参数不变。利用公式(16)计算不同上翼缘含钢率下有支撑和无支撑组合梁临界弯矩,见图 10。可以看出,当含钢率由 38.9%增加到 68.1%时,有支撑和无支撑的 RTFCB-1 梁的临界弯矩提高约

10%~27%;当含钢率由 25.4%增加到 42.0%时,RTFCB-2 梁的临界弯矩提高约 11%~27%,变化较大。说明上翼缘含钢率是矩形管翼缘组合梁弹性侧扭屈曲临界弯矩的主要影响因素,对梁的稳定性影响较大。

## 5 结论

1) 通过对集中荷载下扭转支撑矩形管翼缘组合梁的弹性侧扭屈曲分析,给出矩形管翼缘组合

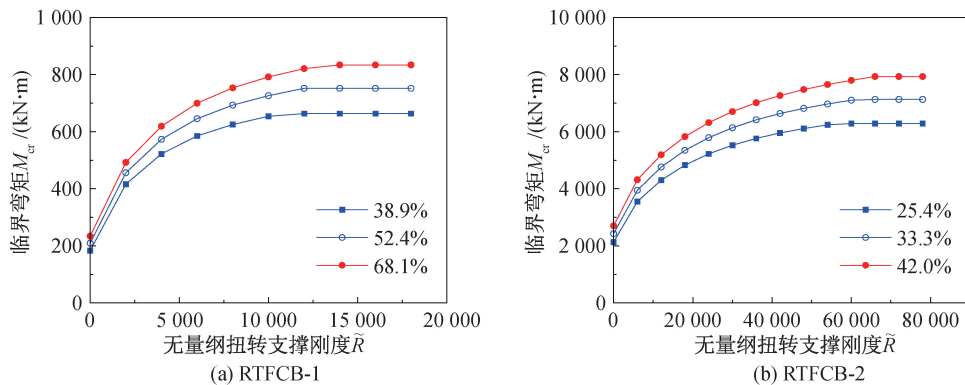


图 10 上翼缘含钢率对临界弯矩的影响

Fig. 10 Influence of steel ratio of the top flange on critical moments

梁的临界弯矩计算公式,经有限元验证,相对误差在5%以内。

2)设置扭转支撑有利于提高矩形管翼缘组合梁的稳定性,当支撑刚度达到门槛刚度时,其临界弯矩不再增加。在实际工程中,应综合考虑支撑刚度和经济的关系,以达到经济性设计的目的。

3)改变混凝土强度或腹板高厚比不会使矩形管翼缘组合梁临界弯矩产生明显变化,而减小跨高比或提高上翼缘含钢率会明显增加组合梁的临界弯矩。

#### 参考文献:

- [1] JI J, XU Z C, JIANG L Q, et al. Nonlinear buckling analysis of H-type honeycombed composite column with rectangular concrete-filled steel tube flanges[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2018, 18(4): 1153-1166.
- [2] JIANG L Q, MA L, HOU X M, et al. Axial compression behavior of elliptical concrete-filled steel tube composite short columns with encased steel considering spherical-cap gap[J]. *Buildings*, 2024, 14(2): 350.
- [3] KIM B, SAUSE R. High performance steel girders with tubular flanges[J]. *Dissertation Abstracts International*, 2005, 5(3): 253-263.
- [4] JI J, HE L J, JIANG L Q, et al. Numerical study on the axial compression behavior of composite columns with steel tube SHCC flanges and honeycombed steel web[J]. *Engineering Structures*, 2023, 283: 115883.
- [5] DIETRICH M Z, CALENZANI A F G, FAKURY R H. Analysis of rotational stiffness of steel-concrete composite beams for lateral-torsional buckling [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109554.
- [6] WANG Y, SHAO Y, CHEN C, et al. Prediction of flexural and shear yielding strength of short span I-girders with concrete-filled tubular flanges and corrugated web-II: numerical simulation and theoretical analysis[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 148: 106593.
- [7] SAUSE R, KIM B, WIMER M R. Experimental study of tubular flange girders[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(3): 384-392.
- [8] SAUSE R. Innovative steel bridge girders with tubular flanges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2015, 11(4): 450-465.
- [9] RANA A D, ANN C K. Design and analysis of concrete-filled tubular flange girders under combined loading[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(11): 2512-2528.
- [10] JI J, LI Y H, JIANG L Q, et al. Flexural behavior of composite beams with concrete filled steel tube flanges and honeycombed steel webs [J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 1-20.
- [11] GAO F, YANG F, ZHU H P, et al. Lateral-torsional buckling behavior of concrete-filled high-strength steel tubular flange beams under mid-span load [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 176: 106398.
- [12] 任亚文. 矩形钢管翼缘梁抗弯性能的试验与理论研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- REN Y W. Experimental and theoretical investigation of bending behavior for rectangular steel tube flange beams [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.
- [13] 张文福. 钢结构平面外稳定理论:下册[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2019.
- ZHANG W F. Out-of-plane stability theory of steel structures: volume 2[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2019.
- [14] 刘迎春, 杨开琳, 计静, 等. 集中荷载作用下弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁稳定性能研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(2): 7-15.
- LIU Y C, YANG K L, JI J, et al. Research on stability performance of rectangular concrete-filled tubular flange I-shaped beam with elastic bracing under concentrated load[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41(2): 7-15.
- [15] 陈克珊. 基于板-梁理论的钢管混凝土翼缘工字形梁组合扭转与弯扭屈曲理论研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- CHEN K S. Theoretical research on combined torsion and flexural-torsional buckling of the I-shaped beams with concrete-filled steel tubular flange based on the plate-beam theory [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [16] YURA J A. Fundamentals of beam bracing[J]. *Engineering Journal*, 2000, 38(1): 11-16.
- [17] ZHANG W F, LIU Y C, HOU G L, et al. Lateral-torsional buckling analysis of cantilever beam with tip lateral elastic brace under uniform and concentrated load [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2016, 16(4): 1161-1173.
- [18] 张文福, 严威, 刘迎春, 等. 均布荷载作用下跨中布置侧向扭转支撑筒支梁弯扭屈曲分析[J]. *东北石油大学学报*, 2019, 43(2): 109-118.
- ZHANG W F, YAN W, LIU Y C, et al. Flexural-torsional buckling analysis of simply supported beam with lateral torsional bracing at mid-span under uniform loading [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2019, 43(2): 109-118.

- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T 101—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [23] 陈道申, 韦芳芳, 朱有华, 等. 双钢板-再生混凝土组合剪力墙抗震性能有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(1): 15-22.  
CHEN D S, WEI F F, ZHU Y H, et al. Finite element analysis of the seismic performance of recycled aggregate concrete-filled double steel plate composite shear walls [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(1): 15-22.
- [24] 袁朝庆, 代晓辉, 宋爽, 等. 底部加强双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2022, 39(2): 11-18.  
YUAN C Q, DAI X H, SONG S, et al. Study on seismic resistance of double steel concrete at the bottom [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2022, 39(2): 11-18.  
(责任编辑 张爱丽)
- 
- (上接第9页)
- [19] BELAID T, AMMARI F, ADMAN R. Influence of load position on critical lateral torsional buckling moment of laterally restrained beam at tense flange[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2018, 19(7): 839-848.
- [20] 曹宇翔, 马宁, 冯树国, 等. 考虑侧向支撑刚度影响的蜂窝钢梁临界弯矩计算研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(4): 24-27+46.  
CAO Y X, MA N, FENG S G, et al. Effect of lateral bracing stiffness on the critical flexural torsional buckling moment of castellated steel beams[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(4): 24-27+46.
- [21] 王新敏, 李义强. ANSYS 结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
WANG X M, LI Y Q. ANSYS structural analysis elements and applications[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [22] 成博. 上翼缘为矩形钢管混凝土的工字形梁静力性能的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.  
CHENG B. Experimental reasearch on static behavior of I-beam with a rectangular concrete-filled tube top flange [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [23] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
HAN L H. Concrete filled steel tubular structures: from theory to practice[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [24] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.  
LIU W. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [25] 严新江. 带矩形管翼缘的钢-高性能混凝土组合梁抗弯性能试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
YAN X J. Experimental investigation of bending behavior for steel and high performance concrete composite girders with concrete filled rectangular tubular up-flanges [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [26] 方天寿. 五边形钢管混凝土翼缘组合梁抗弯性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
FANG T S. Research on flexural behavior of concrete-filled pentagonal flange beam [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [27] JI J, LI Y H, JIANG L Q, et al. Axial compression behavior of strength-gradient composite stub columns encased CFST with small diameter: experimental and numerical investigation [J]. Structures, 2023, 47: 282-298.  
(责任编辑 张爱丽)