

开口截面钢-混凝土组合梁纯扭力学性能

丁发兴^{1,2}, 束舒东¹, 张经科^{1,3}, 何畅¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省装配式建筑工程技术研究中心, 湖南 长沙 410075;

3. 湖南省机场管理集团有限公司, 湖南 长沙 410141)

摘要: 为揭示开口截面钢-混凝土组合梁抗扭工作机理, 提出适用于工程实际的抗扭承载力计算方法, 建立了工字钢-混凝土组合梁精细有限元分析模型, 探究了纯扭作用下混凝土板截面尺寸、混凝土强度、钢梁截面尺寸、钢梁强度、配筋率、宽跨比等参数对组合梁抗扭力学性能的影响。基于组合作用和叠加原理, 提出了考虑混凝土板和钢梁腹板与翼缘抗扭贡献的开口截面钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算公式。结果表明: 组合梁抗扭承载力主要由混凝土板承担, 混凝土板抗扭承载力组合作用系数为1.1, 与实验结果吻合较好, 能较好预测组合梁抗扭承载力。

关键词: 钢-混凝土组合梁; 有限元分析; 抗扭承载力; 最大剪应力; 组合效应

中图分类号: TU 375.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)10-1485-09

Mechanical Performance of Open Cross-Section Steel-Concrete Composite Beams Under Pure Torsion

DING Fa-xing^{1,2}, SHU Shu-dong¹, ZHANG Jing-ke^{1,3}, HE Chang¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Engineering Technology Research Center for Prefabricated Construction Industrialization of Hunan Province, Changsha 410075, China; 3. Hunan Airport Management Group Co. Ltd., Changsha 410141, China. Corresponding author: HE Chang, E-mail: hechang@csu.edu.cn)

Abstract: To reveal the torsional working mechanism of open cross-section steel-concrete composite beams, a calculation method for torsional bearing capacity applicable to engineering practice is proposed. A fine finite element analysis model of I-beam-concrete composite beams is established, and the influence of parameters such as concrete slab section size, concrete strength, steel beam section size, steel beam strength, reinforcement ratio, and width to span ratio on the torsional mechanical performance of composite beams under pure torsion is explored. Based on the principle of combination and superposition, a formula for calculating the torsional bearing capacity of open cross-section steel-concrete composite beams considering the contribution of concrete slab and steel beam web and flange to torsional resistance is proposed. The results show that the torsional bearing capacity of the composite beam is mainly borne by the concrete slab, and the torsional combination coefficient of the concrete slab is 1.1, which is in good agreement with the experimental results and can predict the torsional bearing capacity of the composite beam well.

Key words: steel-concrete composite beams; finite element analysis; torsional bearing capacity; maximum shear stress; combination effect

组合梁的形式和种类众多, 开口截面钢-混凝土组合梁是以工字型钢(开口截面)为钢梁, 通过剪力键连接顶部混凝土板而成的新型结构, 充分发挥了混凝土抗压和钢材抗拉的优势。钢-混凝土组合梁作为一种复合结构, 受扭性能非常复

杂。以钢筋混凝土构件为例, 目前各国规范采用斜弯破坏理论和空间桁架理论进行抗扭设计^[1]。

目前学者们对各类开、闭口截面钢-混凝土组合梁的研究大多集中于抗弯性能^[2-5]以及抗剪性能^[6-12]等, 对钢-混凝土组合梁的抗扭性能研究

收稿日期: 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978664)。

作者简介: 丁发兴(1979-), 男, 浙江瑞安人, 中南大学教授, 博士生导师。

相对较少^[13],且各国规范尚未提出钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算公式.在实际工程中的组合梁往往处于弯扭、剪扭等复合受力状态,因而有必要对纯扭作用下组合梁的力学性能开展相关研究.20世纪70年代,Singh等^[13]开展了各4组工字钢-混凝土组合梁纯扭和弯扭的实验,提出了钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算公式;Ghosh等^[14]进行了6组开口截面钢-混凝土组合梁弯扭力学实验,提出了考虑剪应力连接件作用的钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算公式;Hsu^[15]基于混凝土软化效应的变角桁架模型修正了适用于钢筋混凝土构件抗扭强度的计算公式;聂建国等^[16-17]对Hsu斜弯破坏模型加以修正,建立了考虑混凝土板与钢梁间组合作用的计算模型,开展了工字钢-混凝土组合梁5组纯扭、9组弯扭以及4组钢筋混凝土板纯扭实验;丁发兴等^[6]提出了考虑混凝土翼板和钢梁共同参与抗剪的工字钢-混凝土组合梁抗剪承载力计算公式;门朋飞^[12]对11根组合梁和1根纯钢梁共12个试件的负弯矩区腹板稳定性能进行了实验研究,并基于叠加原理将钢梁和混凝土板各自的抗剪承载力相互叠加,提出了考虑组合作用和叠加原理的组合梁负弯矩区抗剪承载力计算公式.由于组合梁抗扭实验所用试件截面尺寸较小,钢梁抗扭贡献极小,甚至不及混凝土板与钢梁的相互作用效应产生的抗扭承载力增值,故各学者提出的抗扭承载力计算公式都忽略了钢梁自身的抗扭贡献.

为深入研究工字钢-混凝土组合梁抗扭性能,探究钢梁对组合梁抗扭承载力贡献,本文基于混凝土塑性-损伤(concrete plasticity-damage, CDP)本构模型与合理的钢材弹塑性强化本构模型,建立工字钢-混凝土组合梁三维精细有限元足尺抗扭模型,并进行验证;通过参数分析探究组合梁中钢筋混凝土板和钢梁的组合作用及二者的扭矩承担比例,揭示纯扭作用下混凝土板与钢梁截面的应力分布规律;在此基础上,基于叠加原理,考虑钢梁抗扭贡献,提出工字钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算方法,并与已有计算公式对比,验证该计算方法的准确性与适用性.

1 有限元模型与验证

1.1 有限元模型

本文通过ABAQUS有限元平台建立工字钢-混凝土组合梁三维精细有限元足尺抗扭模

型,并使所建模型与实验的边界条件保持一致,用以模拟简支梁受扭时的力学性能,如图1所示.图中 w_c 为混凝土板宽度, h_c 为混凝土板高度, h_s 为钢梁高度, w_s 为钢梁翼缘宽度, t_w 为钢梁腹板厚度, t_f 为钢梁翼缘厚度, L 为组合梁计算跨度, h 为组合梁整体高度, U_x, U_y, U_z 分别表示支座在 X, Y, Z 轴的自由度,采用I20a工字钢,栓钉采用三维线性梁单元,钢梁与栓钉连接采用合并的方式,使其成为1个部件.钢筋网架和栓钉内置于混凝土板中,保证钢筋网架、栓钉和混凝土板单元三者间的协同工作.钢梁与混凝土板之间采用表面与表面接触,二者法向采用硬接触,切向采用面-面无摩擦接触,以此消除钢梁与混凝土板间的粘合作用^[6].混凝土与钢梁和钢筋的本构关系采用了丁发兴课题组提出的约束混凝土塑性-损伤本构模型和弹塑性(硬化)本构模型^[8,18],该本构关系在相关钢-混凝土组合梁的研究中能得到较好的模拟效果^[3-6].为模拟实验中的边界条件,对于组合梁模型,控制固定端支座位置处的钢梁下表面及混凝土翼板上表面的 $U_y=U_z=0$,保证梁纵向位移自由,自由加载端、加载板下端纵轴线自由度为 $U_x=U_y=U_z=0$,考虑到栓钉本身刚度较大,本构模型选用丁发兴课题组提出的二折线弹塑性栓钉强化模型^[18].图1a中 T 为扭矩, F 为集中力.

1.2 实验验证

采用上述建模方式以及已有实验^[16-17,19]中的参数进行受扭模拟分析,作出扭矩(T)-扭率(θ')曲线,图2为实验与有限元计算结果的曲线. f_s 为钢材屈服强度, σ_y 为钢筋屈服强度, σ_{cu} 为混凝土强度, ρ_l, ρ_t 分别为纵筋配筋率和箍筋配箍率,各试件编号对应参数如表1所示.纯扭组合梁试件为CBT,纯扭混凝土板试件为RCST, s 为箍筋间距.图2a中 $\sigma_s=299.6$ MPa, $\sigma_y=302.2$ MPa;图2b中 $\sigma_s=299.6$ MPa, $\sigma_y=328.1$ MPa;图2c中 $\sigma_y=343$ MPa, $\rho_l=0.44\%$;图2d中 $\sigma_y=343$ MPa, $\rho_l=0.61\%$.其中,试件CBT-1的 $\rho_l=0.52\%$, $\rho_t=0.63\%$;试件CBT-2的 $\rho_l=0.52\%$, $\rho_t=0.79\%$;试件CBT-3的 $\rho_l=0.44\%$, $\rho_t=0.34\%$;试件CBT-4的 $\rho_l=0.44\%$, $\rho_t=0.48\%$;试件RCST-1的 $\sigma_{cu}=39.5$ MPa, $\rho_t=0.42\%$;试件RCST-2的 $\sigma_{cu}=37.6$ MPa, $\rho_t=0.31\%$;试件RCST-3的 $\sigma_{cu}=40.0$ MPa, $\rho_t=0.91\%$;试件RCST-4的 $\sigma_{cu}=36.6$ MPa, $\rho_t=0.56\%$.表1列出了组合梁和钢筋混凝土板的抗扭承载力的实验值 T_e 和有限元计算值 T_s .经分析比较,组合梁中 T_e/T_s 的均值为1.00,离散系数为0.05,混凝土板 T_e/T_s 的均

值为 0.97, 离散系数为 0.07, 表示有限元模型对工字钢-混凝土组合梁及钢筋混凝土板均模拟良好。

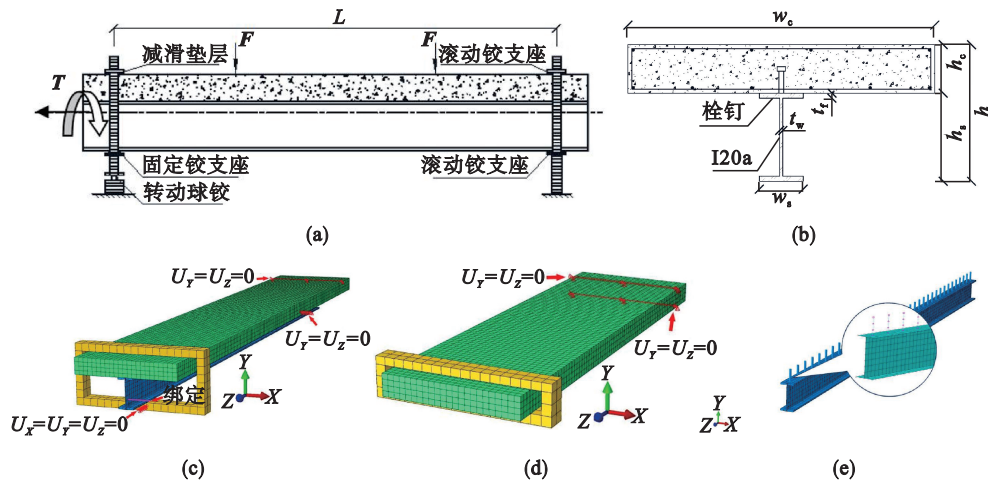


图 1 组合梁抗扭计算简图及有限元模型

Fig. 1 Calculation diagram and finite element model of torsional resistance of composite beams

(a)—计算简图; (b)—截面示意图; (c)—整体有限元模型; (d)—混凝土板有限元模型; (e)—钢梁有限元模型。

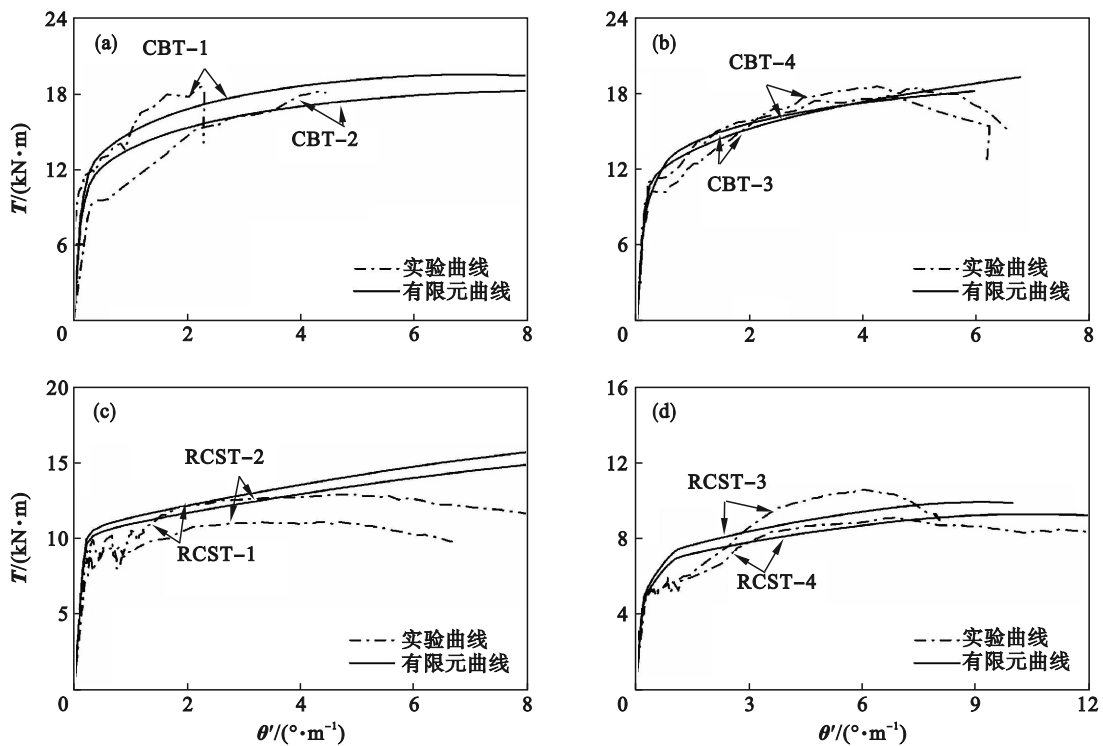


图 2 实验与有限元扭矩-扭率曲线对比

Fig. 2 Comparison diagram of $T-\theta'$ curves between experiment and finite element analysis

(a)—钢-混凝土组合梁 CBT-1, CBT-2; (b)—钢-混凝土组合梁 CBT-3, CBT-4;
(c)—钢筋混凝土板 RCST-1, RCST-2; (d)—钢筋混凝土板 RCST-3, RCST-4.

2 参数分析

根据《钢结构设计标准》^[20]要求,采用上述建模方法建立工字钢-混凝土组合梁足尺抗扭模型,部分足尺模型算例参数见表 2,混凝土强度取值范围为 C30~C60,钢材屈服强度为 Q235~

Q420,为满足钢梁腹板宽厚比要求,钢梁腹板厚度 t_w 取 16~30 mm,翼缘厚度 t_f 统一取 20 mm. d_s 为栓钉直径.

2.1 扭矩-扭率曲线

有限元模拟结果表明混凝土强度、混凝土板截面尺寸、配箍率、宽跨比对 $T-\theta'$ 曲线影响较大,而钢梁屈服强度、纵筋配筋率、钢梁截面尺寸对

表 1 抗扭承载力有限元分析与实验结果比较

Table 1 Comparison of finite element analysis and experiment results of torsional bearing capacity

试件编号	$w_c \times h_c \times w_s \times h_s / \text{mm}$	L / mm	s / mm	σ_s / MPa	σ_y / MPa	σ_{cu} / MPa	$T_e / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$T_a / (\text{kN} \cdot \text{m})$	T_e / T_a
CBT-1	700×110×100×200	3 800	100	299.6	302.2	41.0	18.34	19.27	0.95
CBT-2	700×110×100×200	3 800	80	299.6	302.2	35.5	18.20	17.88	1.02
CBT-3	700×110×100×200	1 800	180	299.6	328.1	26.0	17.78	16.50	1.08
CBT-4	700×110×100×200	1 800	130	299.6	328.1	32.0	18.52	19.78	0.94
RCST-1	700×110×100×200	3 800	100	—	343.0	39.5	12.94	13.80	0.94
RCST-2	700×110×100×200	3 800	80	—	343.0	37.6	11.24	12.78	0.88
RCST-3	700×110×100×200	1 800	180	—	343.0	40.0	10.51	9.88	1.06
RCST-4	700×110×100×200	1 800	130	—	343.0	36.6	9.07	9.24	0.98

表 2 部分足尺算例参数

Table 2 Partial full scale calculation parameters

L / mm	w_c / mm	h_c / mm	w_s / mm	h_s / mm	d_s / mm	栓钉布置
4 000	800	120	100	200	16	单排
8 000	1 500	140	250	350	19	双排
12 000	2 200	150	400	500	19	双排

$T-\theta'$ 曲线影响相对较小.图 3 给出主要影响参数下的钢-混凝土组合梁扭矩-扭率曲线,图中表明抗扭承载力主要随混凝土强度等级提高、混凝土板尺寸增加而增加,且增加混凝土强度和混凝土板厚度产生的扭矩增幅明显高于增加混凝土板宽度产生的扭矩增幅.

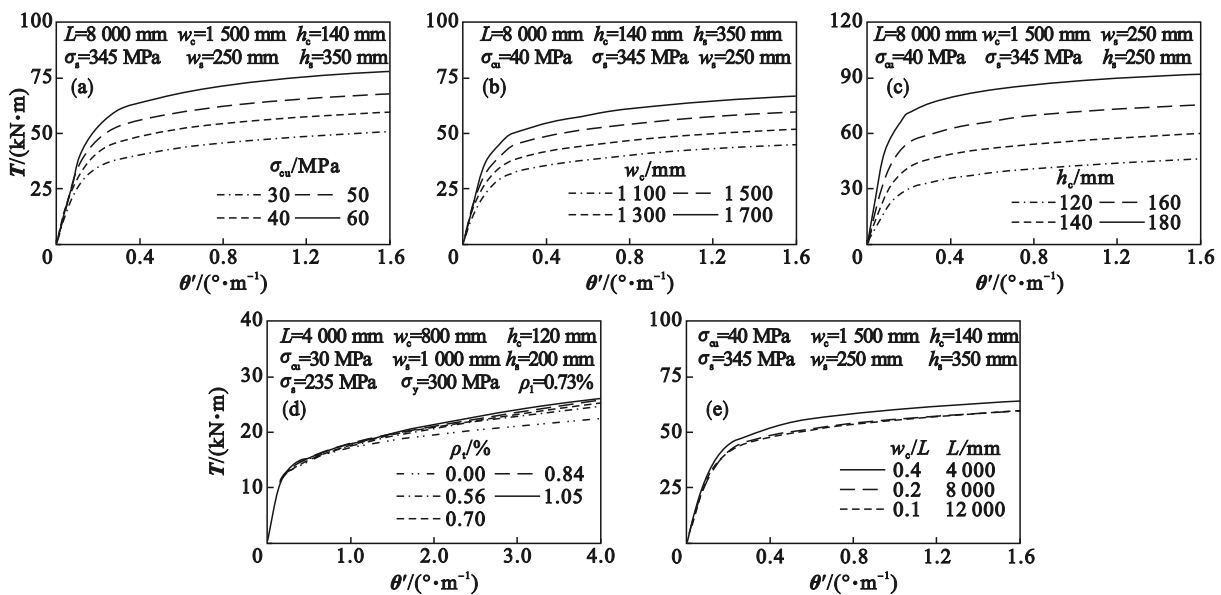


图 3 主要影响因素的参数分析曲线

Fig. 3 Parametric analysis curves for main influencing factors

(a)—混凝土强度; (b)—混凝土板宽度; (c)—混凝土板厚度; (d)—配箍率; (e)—宽跨比.

2.2 钢梁受力分析

图 4 为组合梁中的钢梁(以下简称组合钢梁)和纯钢梁在相同转角位移作用下的受扭情况,组合钢梁受上部混凝土板的约束,上翼缘翘曲程度比相同位移下的纯钢梁小,而腹板处变形较大.

图 5 为 8 m 组合钢梁跨中截面应力分布随荷载的变化规律与荷载对应位移下纯钢梁跨中截面应力分布规律的比较情况.其中, σ_s 为正应力, τ_s 为剪应力, T_e 为抗扭承载力.有限元模拟结果表明组合钢梁受扭时,上部混凝土翼板与钢梁之间

存在的组合作用与栓钉根部产生的应力重分布引起钢梁不规则正应力,从而影响钢梁截面正应力分布规律,小幅提升上翼缘剪应力值.但钢梁截面剪应力分布规律基本不受影响,钢梁截面可形成与纯钢梁相似的闭合剪力流.因此组合钢梁承担扭矩可通过开口截面梁弹性阶段扭矩计算公式计算.全扭转过程中,钢梁始终处于弹性状态且与混凝土板保持基本相同的扭转角,破坏时混凝土板和钢梁的扭率相等,组合钢梁受扭极限状态取决于上部混凝土板.

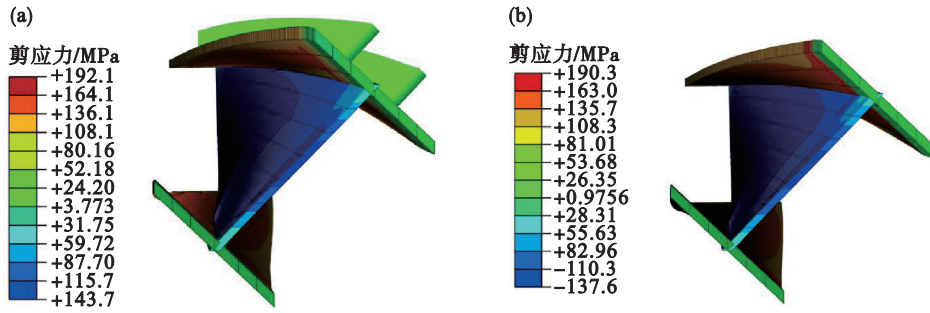


图 4 组合钢梁和纯钢梁受扭形式对比

Fig. 4 Comparison of torsional forms of composite steel beams and steel beams

(a)—组合钢梁; (b)—纯钢梁.

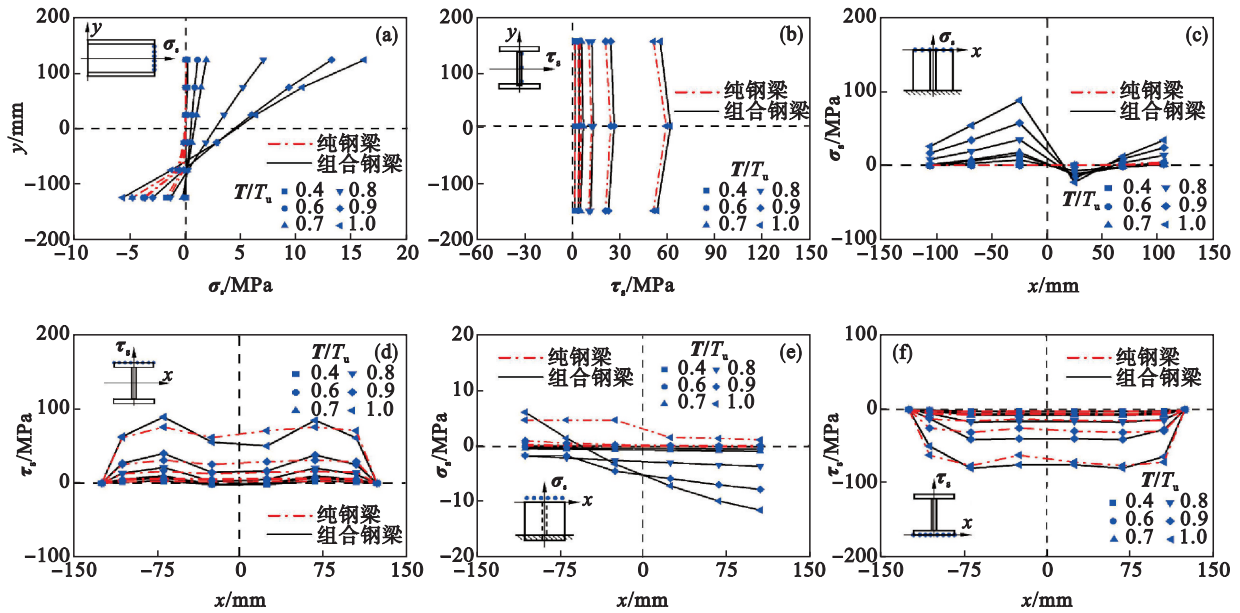


图 5 组合钢梁与纯钢梁截面应力分布随荷载的变化规律对比

Fig. 5 Comparison of change law of stress distribution with load in cross-section of composite steel beam and steel beam

(a)—腹板正应力分布; (b)—腹板剪应力分布; (c)—上翼缘正应力分布; (d)—上翼缘剪应力分布; (e)—下翼缘正应力分布; (f)—下翼缘剪应力分布.

2.3 混凝土板受力分析

组合钢梁中混凝土板与纯混凝土板的抗扭性能比较如图 6 和图 7 所示,图中 τ 表示剪应力二者均为 $L=8\ 000\text{ mm}$, $w_c \times h_c=1\ 500\text{ mm} \times 140\text{ mm}$, $w_s \times h_s=250\text{ mm} \times 350\text{ mm}$, $f_{cu}=40\text{ MPa}$, $f_s=345\text{ MPa}$. 可见:①组合梁中混凝土板上表面最大剪应力(τ_b)-剪应变(γ)与纯混凝土板最大剪应力(τ_c)-剪应变(γ)曲线基本一致,表明钢梁对混凝土板上表面最大剪应力大小影响较小;②由于受扭钢梁的约束,组合梁中混凝土板承担的扭矩(T_b)相比纯混凝土板承担的扭矩(T_c)有所提高,提高幅度为 1.0~1.2 倍,平均为 1.1 倍,表明受扭荷载下钢-混凝土组合梁的组合作用可使混凝土板抗扭承载力提高 10%~20%,因此定义受扭组合梁中混凝土板组合作用系数为 1.1.

3 实用计算公式

3.1 工字钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算公式

组合梁抗扭承载力可由钢梁和混凝土板承担的扭矩值相互叠加而得,抗扭承载力 T_u 为

$$T_u = \alpha(T_s + 1.1T_c). \quad (1)$$

式中: α 为宽跨比影响系数; T_s 为钢梁承担的扭矩值; T_c 为纯混凝土板极限扭矩值.

受扭时假定切应力沿壁厚方向不变,由材料力学可得钢梁弹性阶段工字形开口截面梁扭转公式为

$$T_s = \eta I \tau_s / t_m. \quad (2)$$

式中: η 为修正系数,工字钢 $\eta=1.2$; τ_s 为钢梁截面

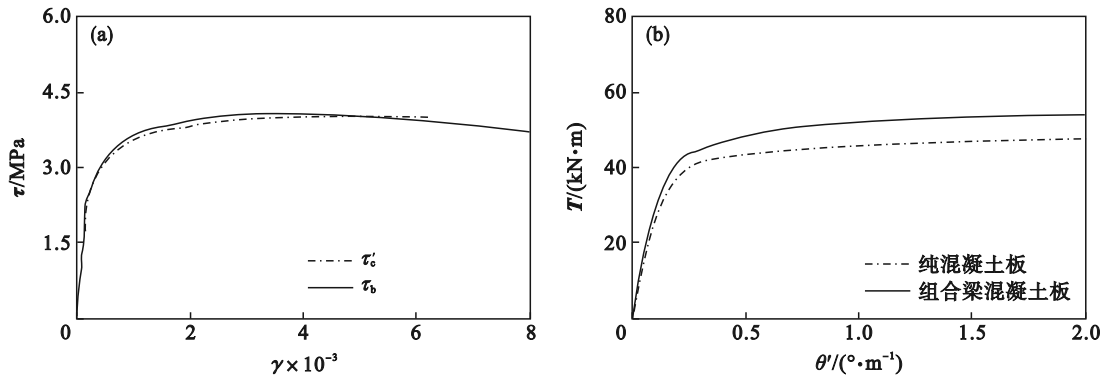


图6 组合梁混凝土板与纯混凝土板 $\tau-\gamma$ 对比、 $T-\theta'$ 对比

Fig. 6 Comparison of $\tau-\gamma$ and $T-\theta'$ between composite beam concrete slab and concrete slab

(a)—混凝土板上表面最大剪应力 $\tau-\gamma$ 曲线对比; (b)— $T-\theta'$ 曲线对比.

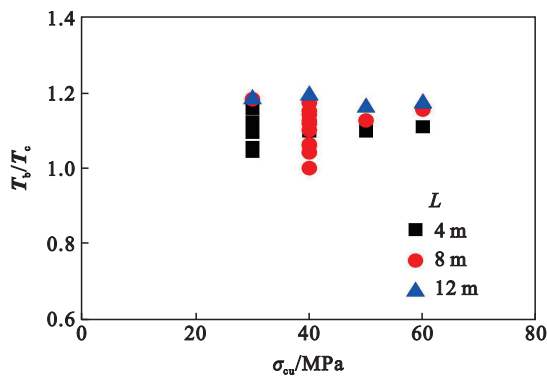


图7 各参数下 T_v/T_c 变化规律

Fig. 7 Variation law of T_v/T_c under different parameters conditions

最大剪应力; t_m 为钢梁厚度最大值; I_t 为钢梁截面扭转惯性矩.

图8给出了算例中组合梁混凝土板受扭时的截面剪应力分布情况,下部钢梁参与抗扭,混凝土板中性面下移,可见剪应力沿径向近似为线性,假定剪应力沿径向为线性分布,则组合梁混凝土板承担扭矩为^[21]

$$T_b = 1.1w_c h_c^2 \tau_c / 3, \quad (3)$$

式中, τ_c 为钢筋混凝土板最大剪应力.

由式(1)~(3)可得工字钢-混组合梁抗扭承载力为

$$T_u = 1.2\alpha I_t \tau_s / t_m + 1.1\alpha w_c h_c^2 \tau_c / 3. \quad (4)$$

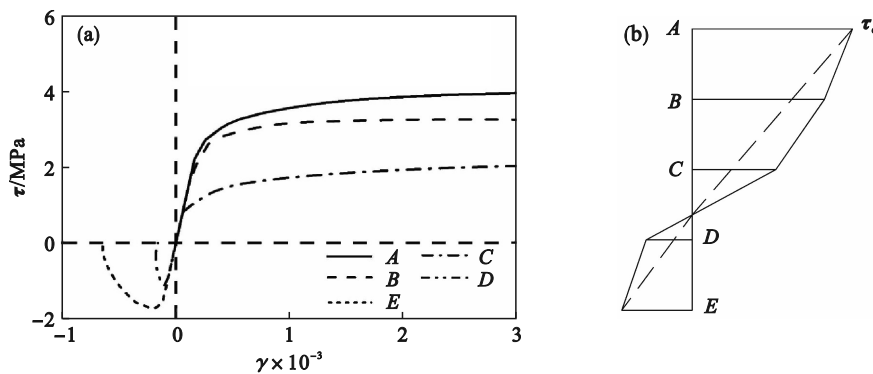


图8 混凝土板剪应力分布情况

Fig. 8 Shear stress distribution of concrete slabs

(a)—混凝土板截面 $\tau-\gamma$ 曲线分布; (b)—截面剪应力分布示意图.

图9给出了组合梁中混凝土翼板和钢梁各自承担的扭矩随配箍率的变化情况.可见组合梁中混凝土板未配置箍筋时,扭矩基本由混凝土翼板承担, T_v/T_u 比值约为 0.96, T_s/T_u 比值约为 0.04. 当混凝土翼板配置适量箍筋时,构件扭转能力提高,扭转角增大使钢梁抗扭贡献增大, T_v/T_u 比值为 0.77~0.87, 均值为 0.84. T_s/T_u 比值为 0.13~0.23, 均值为 0.16. 点 A~E 为沿混凝土板截面径向分布

的点.

3.2 钢筋混凝土板最大剪应力计算公式

根据《混凝土结构设计规范》^[22] 对抗扭构件配筋强度比 ζ 的建议, 本文取 0.8~1.0 范围内 ζ 进行分析, 图 10 所示为不同参数时钢筋混凝土板最大剪应力 (τ_c) 与素混凝土板最大剪应力 (τ'_c) 的比值随配箍率 (ρ_v) 的变化规律. 可见: ① 随着配箍率的提高, τ_c/τ'_c 有一定程度的提高且在 1.09~1.43 之

间大致线性增长;②混凝土强度、钢筋屈服强度、混凝土板截面尺寸的变化对 τ_c/τ'_c 比值影响都不大,影响范围分别为 9%,2% 和 4%,因此配筋率是混凝土板最大剪应力的主要影响因素。

图 11 和图 12 分别给出了 48 组算例分析结果下 τ_c/τ'_c 随 ρ_t 的变化规律以及 τ'_c 随混凝土立方体抗压强度 f_{cu} 的变化规律,可得钢筋混凝土板最大剪应力 τ_c 计算表达式为

$$\tau_c = 0.35(1 + 0.39\rho_t^{0.72})f_{cu}^{0.6} \quad (5)$$

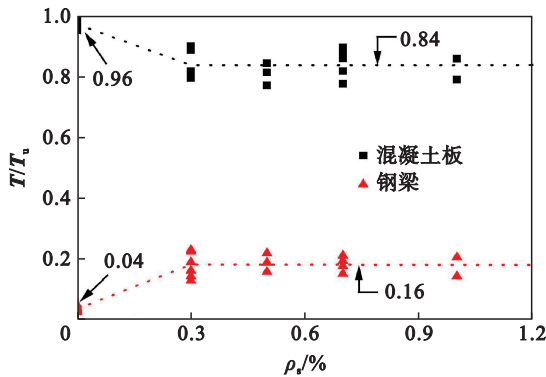


图 9 混凝土板和钢梁承担扭矩比例

Fig. 9 Ratio of torque borne by concrete slabs and steel beams

3.3 钢梁最大剪应力计算公式

图 13a 给出了配筋强度比 ζ 为 0.8~1.0 范围内 4 m 算例中钢梁截面最大剪应力 ($\tau_{s,4}$) 与配筋率 (ρ_t) 的变化规律,图 13b 给出了不同钢梁截面尺寸下钢梁截面最大剪应力 (τ_s) 与 4 m 算例钢梁截面最大剪应力 ($\tau_{s,4}$) 的比值 $\tau_s/\tau_{s,4}$ 与扭转惯性矩 $I_t^{[21]}$ 的变化规律,可得钢梁截面最大剪应力 τ_s 计算表达式为

$$\tau_s = 0.97 \times (116 - 100e^{-11\rho_t})I_t^{-0.22} \quad (6)$$

3.4 宽跨比影响系数

为计算不同宽跨比对抗扭承载力的影响,增设 $w_c/L=0.1, 0.3, 0.4, 0.5$ 共计 20 组算例.图 13c 为组合梁抗扭承载力 (T_u) 与宽跨比为 0.2 时抗扭承载力 ($T_{0.2}$) 比值 $T_u/T_{0.2}$ 与宽跨比 w_c/L 的变化规律,可得计算表达式为

$$T_u = \alpha T_{0.2} = [1.19 - 0.19 / (1 + (3.3w_c/L)^2)] T_{0.2} \quad (7)$$

3.5 计算公式的比较

表 3 给出了 Hsu^[15] 和聂建国等^[17] 建议的组合梁抗扭承载力计算式(8)与式(9),图 14 为本文所建立的钢-混凝土组合梁有限元模型计算值 (T_a) 与上述公式计算值 (T_q) 比值的散点图.表 4 给出了 4 组实验值 (T_l)、55 组有限元值 (T_a) 分别与上述

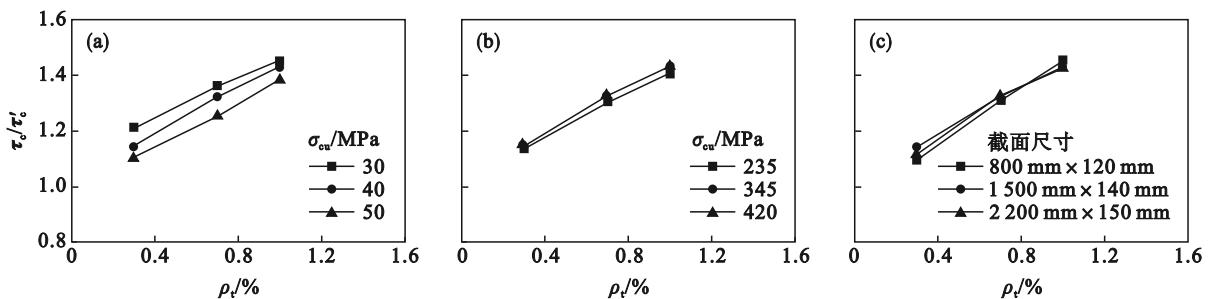


图 10 $\tau_c/\tau'_c \sim \rho_t$ 曲线参数分析结果

Fig. 10 Parameter analysis results of $\tau_c/\tau'_c \sim \rho_t$ curves

(a)—混凝土强度; (b)—钢筋屈服强度; (c)—混凝土截面尺寸。

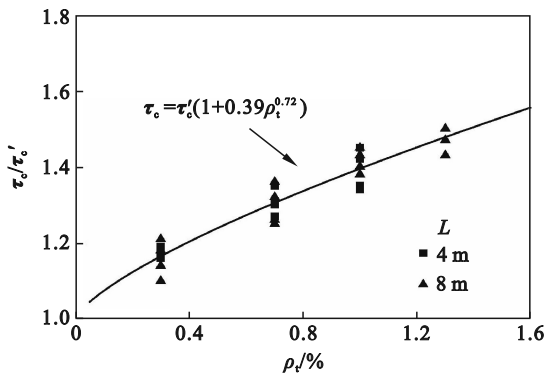


图 11 $\tau_c/\tau'_c \sim \rho_t$ 回归曲线

Fig. 11 Regression curve of $\tau_c/\tau'_c \sim \rho_t$

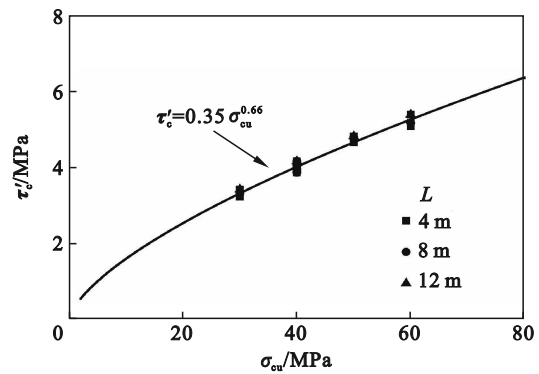


图 12 $\tau'_c \sim \sigma_{cu}$ 回归曲线

Fig. 12 Regression curve of $\tau'_c \sim \sigma_{cu}$

公式计算值(T_q)的比较结果.实验值(T_t)与式(4)计算值(T_q)比值均值为 1.02,离散系数为 0.05,实验值(T_t)与式(8)计算值(T_q)比值均值为 1.20,离散系数为 0.02,实验值(T_t)与式(9)计算值(T_q)比值均值为 1.07,离散系数为 0.08.有限元值(T_a)与式(4)计算值(T_q)比值均值为 1.01,离散系数为 0.04,有限元值(T_a)与式(8)计算值(T_q)比值均值为 0.97,离散系数为 0.19,有限元值(T_a)与式(9)计算值(T_q)比值均值为 1.10,离散系数为 0.10.式(8)

忽略了钢梁抗扭贡献和组合作用,而在足尺模型的计算中公式计算结果将小于有限元值,式(9)虽未考虑钢梁贡献,但在一定程度上考虑了钢梁与混凝土板的组合作用,故公式计算值接近有限元值.综上可知:式(4)计算结果与实验结果吻合良好偏于安全,且离散性较小,表明考虑钢梁抗扭和组合作用的计算方法能较为准确地预测小尺寸试件和足尺有限元组合梁模型的抗扭承载力.

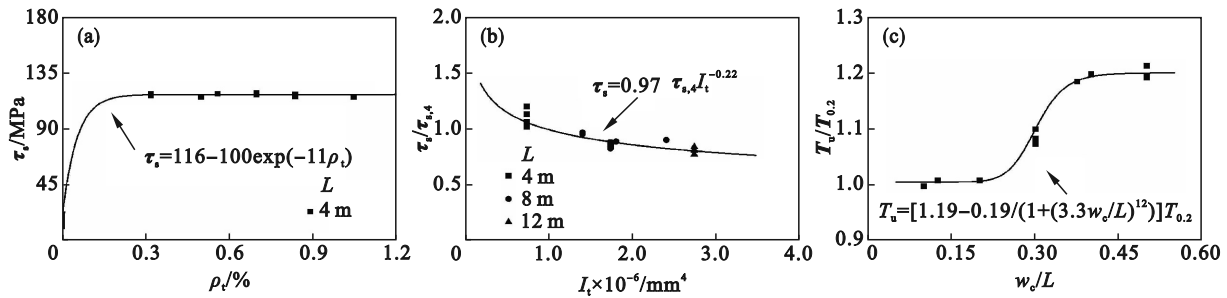


图 13 不同参数回归曲线分析

Fig. 13 Regression curve analyses with different parameters

(a)— $\tau_s \sim \rho_t$ 关系回归曲线; (b)— $\tau_s / \tau_{s,4} \sim I_t$ 关系回归曲线; (c)— $T_u / T_{0.2} \sim w_c / L$ 关系回归曲线.

表 3 工字钢-混凝土组合梁抗扭承载力计算公式

Table 3 Calculation formula for torsional bearing capacity of I-beam-concrete composite beams

序号	公式	参考文献
1	$T_u = T_c + T_s = 3.089w_c \times \sqrt[3]{x^5 \sigma_c + \alpha h_{cl} w_{cl} A_{svl} \sigma_{sy}} / s$ $\alpha = 0.66m + w_{cl} / h_{cl}, m = 0.5A_{svl} s / [A_{s1}(h_{cl} + w_{cl})]$	(8) [15]
2	$T_u = \alpha W_{tp} \sigma_t + \beta \sigma_{sy} A_{svl} A_{cor} / s$ $\alpha = 1.10 - 0.25\rho, \beta = 0.83 + 5.66\rho - 5.36\rho^2$	(9) [17]

注: x_1 为短边箍筋轴线长度, y_1 为长边箍筋轴线长度, A_{svl} 为单肢箍筋截面积, σ_{sy} 为箍筋屈服强度, A_{s1} 为纵筋截面积, σ_t 为混凝土轴心抗压强度, ρ 为配筋率, A_{cor} 为箍筋轴线围成截面积, W_{tp} 为抗扭塑性截面模量, σ_c 为混凝土轴心抗压强度.

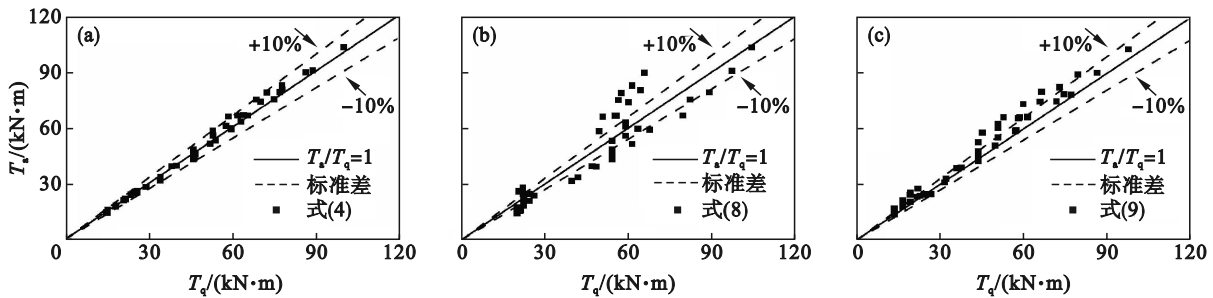


图 14 有限元值与公式值比较结果

Fig. 14 Comparison results of finite element values and formula values

(a)—本文建议公式; (b)—文献[16]; (c)—文献[18].

表 4 抗扭承载力公式有限元计算结果与实验结果的比较
Table 4 Comparison between finite element analysis and experiment results of the torsional bearing capacity formula

公式编号	T_t / T_q		T_a / T_q	
	均值	离散系数	均值	离散系数
式(4)	1.02	0.05	1.01	0.04
式(8)	1.20	0.02	0.97	0.19
式(9)	1.07	0.08	1.10	0.10

4 结 论

1) 采用 ABAQUS 有限元软件建立工字钢-混凝土组合梁三维精细有限元足尺抗扭模型,并进行实验验证,分析结果表明混凝土强度、混凝土板截面尺寸、配筋率、宽跨比对 $T-\theta'$ 曲线影响

较大,而钢梁屈服强度、纵筋配筋率、钢梁截面尺寸对 $T-\theta$ 曲线影响相对较小。

2) 组合梁足尺有限元模型分析结果表明,钢-混凝土组合梁在扭转荷载作用下主要由混凝土板承担抗扭工作;扭转过程中钢梁始终处于弹性阶段,钢梁截面可形成闭合剪力流,组合钢梁承担扭矩可通过开口截面梁弹性阶段扭矩计算公式计算。

3) 足尺有限元模型的参数分析表明,混凝土板抗扭承载力组合作用系数为 1.1,基于叠加原理考虑混凝土板和钢梁的贡献所提出的工字钢-混凝土组合梁的实用计算公式形式简洁,精确度高,适用于开口截面钢-混凝土组合梁的抗扭承载力计算。

参考文献:

- [1] 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.)
- [2] Wang Y C. Deflection of steel-concrete composite beams with partial shear interaction [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1998, 124(10): 1159-1165.
- [3] Ding F X, Liu J, Liu X M, et al. Flexural stiffness of steel-concrete composite beams under positive moment [J]. *Steel and Composite Structures*, 2016, 20(6): 1369-1389.
- [4] Ding F X, Ding H, He C, et al. Method for flexural stiffness of steel-concrete composite beams based on stiffness combination coefficients [J]. *Computers and Concrete*, 2022, 29(3): 127-144.
- [5] Ding F X, Liu J, Liu X M, et al. Flexural capacity of steel-concrete composite beams under hogging moment [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1-13.
- [6] 丁发兴,王恩,吕飞,等.考虑组合作用的钢-混凝土组合梁抗剪承载力[J].工程力学,2021,38(7):86-98.
(Ding Fa-xing, Wang En, Lyu Fei, et al. Composite action of steel-concrete composite beams under lateral shear force [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(7): 86-98.)
- [7] Ollgaard J G, Slutter R G, Fisher J W. Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete [J]. *AISC Engineering Journal*, 1971, 8(2): 55-64.
- [8] Ding F X, Ying X Y, Zhou L C, et al. Unified calculation method and its application in determining the uniaxial mechanical properties of concrete [J]. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2011, 5(3): 381-393.
- [9] Uddin M A, Sheikh A H, Brown D, et al. Geometrically nonlinear inelastic analysis of steel-concrete composite beams with partial interaction using a higher-order beam theory [J]. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 2018, 100: 34-47.
- [10] Jaafer A A, Kareem S L. Behavior of curved steel-concrete composite beams under monotonic load [J]. *International Journal of Mathematical Engineering and Management Sciences*, 2020, 5(6): 1210-1233.
- [11] Liang X, Duan S J, Wang Y Y, et al. Experimental and theoretical study on the behavior of the laminated action of steel-concrete composite beam in negative bending moment region [J]. *Advanced Steel Construction*, 2020, 16(3): 216-222.
- [12] 门鹏飞.钢-混凝土组合梁负弯矩区受剪性能及其抗剪承载力计算方法研究[D].重庆:重庆大学,2021.
(Men Peng-fei. Study on shear performance and shear capacity calculation method of steel-concrete composite girders in negative moment regions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.)
- [13] Singh R K, Mallick S K. Experiments on steel-concrete composite beams subjected to torsion and combined flexure and torsion [J]. *India Concrete Journal*, 1977, 51(1): 24-30.
- [14] Ghosh B, Mallick S K. Strength of steel-concrete composite beams under combined flexure and torsion [J]. *India Concrete Journal*, 1979, 53(2): 48-53.
- [15] Hsu T C. Softened truss model theory for shear and torsion [J]. *ACI Structural Journal*, 1988, 85(6): 624-635.
- [16] 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.
(Nie Jian-guo. Steel-concrete composite beams structure: experiment, theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005.)
- [17] 聂建国,朱红超,罗玲,等.开口截面钢-混凝土组合梁受扭的试验分析[J].建筑结构学报,2002,23(2):48-54.
(Nie Jian-guo, Zhu Hong-chao, Luo Ling, et al. Experimental analysis on composite steel-concrete beams with open section under combined flexure and torsion [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(2): 48-54.)
- [18] Ding F X, Cao Z Y, Lyu F, et al. Practical design equations of the axial compressive capacity of circular CFST stub columns based on finite element model analysis incorporating constitutive models for high-strength materials [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 16: e01115.
- [19] 聂建国,唐亮,朱林森.钢筋混凝土板式构件抗扭机理分析[J].清华大学学报(自然科学版),2006,46(6):760-764.
(Nie Jian-guo, Tang Liang, Zhu Lin-sen. Analysis of reinforced concrete slabs subjected to pure torsion [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2006, 46(6): 760-764.)
- [20] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
(Standard for classification of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.)
- [21] 孙训方,方孝淑,关来泰.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2009.
(Sun Xun-fang, Fang Xiao-shu, Guan Lai-tai. Material mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.)
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
(Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the Peoples' Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.)