

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

刘迎春¹, 杨开琳¹, 计静^{1*}, 张文福², 邓世林¹, 张智超¹

(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. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 为研究弹性支撑刚度对矩形钢管混凝土翼缘工字形梁稳定性能的影响, 开展了集中荷载作用下3根带有不同弹性支撑刚度的矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的稳定性能试验, 研究试验梁的位移及应变的变化规律, 获得梁的失稳形式和稳定承载力。试验结果表明, 整个加载破坏过程分为三个阶段, 即弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段, 3根试验梁均发生整体弯扭屈曲失稳。随着弹性支撑刚度增加, 梁稳定承载力增大, 验证了设置弹性支撑可有效地提高该梁的稳定承载力。在试验基础上, 利用 ANSYS 有限元软件对该梁进行非线性屈曲分析, 将获得的稳定承载力与试验结果进行对比, 误差均小于5%, 从而验证有限元分析方法的正确性。最后, 研究了混凝土强度、上翼缘含钢率和腹板高厚比等参数对该类梁稳定性能的影响规律。研究表明, 增大上翼缘钢管含钢率和减小腹板高厚比均可明显提高该类梁的稳定承载力, 而增强混凝土强度对梁的稳定承载力提高较小。

关键词: 钢管混凝土翼缘梁; 弹性支撑; 整体稳定; 承载力

中图分类号: TU398

文献标识码: A

Research on Stability Performance of Rectangular Concrete-filled Tubular Flange I-shaped Beam with Elastic Bracing Under Concentrated Load

LIU Yingchun¹, YANG Kailin¹, JI Jing^{1*}, ZHANG Wenfu², DENG Shilin¹,
ZHANG Zhichao¹

(1. Heilongjiang Key Lab of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering,
Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. School of Architecture
Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, Jiangsu 211167, China)

Abstract: In order to study the effect of elastic support stiffness on the stability performance of rectangular steel tube concrete flange I-shaped beams, stability performance tests were conducted on three rectangular steel tube concrete flange I-shaped beams with different elastic support stiffnesses under concentrated load. The displacement and strain changes of the test beams were studied, and the instability form and stable bearing capacity of the beams were obtained. The experimental results show that the entire loading failure process is divided into three stages, namely the elastic stage, the elastic-plastic stage, and the failure stage. All three test beams experience overall bending torsional buckling instability. As the stiffness of the elastic support increases, the stable bearing capacity of the beam increases, which verifies that setting elastic support can effectively improve the stable bearing capacity of the beam. On the basis of the experimental results, nonlinear buckling analysis was conducted on the beam

收稿日期: 2023-07-26

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)

作者简介: 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。

using ANSYS finite element software. The obtained stable bearing capacity is compared with the experimental results, and the error is less than 5%, thus verifying the correctness of the finite element analysis method. Finally, the influences of parameters such as concrete strength, upper flange steel content, and web thickness ratio on the stability performance of this type of beam are studied. The results show that increasing the steel content of the upper flange steel pipe and reducing the height to thickness ratio of the web can significantly improve the stable bearing capacity of the beam, while enhancing the concrete strength has a relatively small effect on the stable bearing capacity of the beam.

Key words: concrete-filled tubular flange beam; elastic bracing; overall stability; bearing capacity

钢管混凝土翼缘工字形梁是一种用钢管混凝土翼缘代替平面钢板的新型钢-混凝土的新型组合梁,在翼缘中填充混凝土可以显著提高构件的强度和刚度,从而有效避免钢管发生局部屈曲^[1-2]。与传统的工字形梁相比,这种新型组合梁具有更高的抗弯刚度、扭转刚度和整体稳定性^[3]。Sause 等^[4-5]利用 ANSYS 有限元方法对钢管混凝土翼缘工字形梁的弯扭屈曲进行研究,获得了弯扭屈曲承载力计算公式。严新江^[6]开展了直腹板和波形腹板矩形钢管混凝土翼缘梁的静力性能试验,并进行理论分析,给出该类梁的合理截面尺寸以及最佳设计范围。Ji 等^[7]利用有限元软件对上下翼缘均为钢管混凝土、腹板均为圆孔的组合梁进行四点弯曲荷载模拟分析,研究发现增加翼缘和腹板的钢强度、钢管和腹板的厚度均可以提高此类梁的抗弯性能。Shao 等^[8]提出一种带有加劲肋的矩形空心翼缘梁(Rectangular Stiffened Compression Hollow Flange Beam, SCHFB),并比较 SCHFB 梁、工字形钢梁的极限承载力和局部变形性能,结果表明, SCHFB 梁具有更好的极限承载力和局部变形性能。张文福等^[9-12]通过试验和理论研究,提出四种单轴对称钢管混凝土翼缘工字形梁的弹塑性受弯承载力计算公式,并基于板-梁理论给出弯扭屈曲临界弯矩的计算公式。Gao 等^[13]以 6 根钢管混凝土翼缘工字形梁为研究对象,开展了跨中集中荷载作用下的静力试验,经研究发现钢管内填充混凝土后可以有效地提高梁的抗变形能力。

在实际工程中,梁与梁之间设置侧向支撑可以有效限制梁发生平面外的侧向变形和扭转,从而提高钢梁的整体稳定性。国内外许多学者对侧向支撑梁的屈曲性能进行了大量研究。Lee 等^[14]研究离散支撑作用下工字形梁的弯扭屈曲,给出在离散扭转支撑作用下梁弯扭屈曲强度的解析解。Belaid 等^[15]研究荷载作用位置对横向约束梁弯扭屈曲临界弯矩的影响,发现当荷载作用于受拉翼缘时,横向约束对临界弯矩有着显著影响。

Beyer 等^[16]提出具有离散横向约束的工字形梁侧扭屈曲设计的简化方法,并与规范中给出的弯扭屈曲设计方法进行比较。在此背景下,本文采用试验和数值模拟相结合的方法,对 3 根带有不同弹性支撑刚度的矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的稳定性能进行研究,并讨论影响该类梁稳定性能的主要因素,为研究该类梁的弹塑性稳定分析提供参考经验。

1 试验概况

1.1 试件设计

基于 Sause 和 Kim 对钢管混凝土翼缘工字形梁的理论和试验分析^[17]得到腹板宽厚比和长细比的限值,同时考虑到加载装置支座间的距离等实际因素,试验共设计了 3 根带有不同支撑刚度的矩形钢管混凝土翼缘工字形梁(Rectangular Concrete-filled Tubular Flange I-shaped Beam with Lateral Bracing, CFRTFB-EB)。试验梁的几何参数见图 1,为研究不同支撑刚度的影响,三根试验梁除支撑刚度不同,其他几何尺寸均相同,上翼缘钢管宽度 $b_{\text{fl}} = 60 \text{ mm}$ 、高度 $h_{\text{fl}} = 40 \text{ mm}$ 、厚度 $t_{\text{fl}} = 3 \text{ mm}$ 、腹板高度 $h_{\text{w}} = 250 \text{ mm}$ 、腹板厚度 $t_{\text{w}} = 6 \text{ mm}$ 、高度 $H = 296 \text{ mm}$ 、净跨度 $L = 4\,000 \text{ mm}$ 、跨高比为 13.5。但由于试验在加工阶段存在不可避免的误差,其各部分最终的实际尺寸见表 1 所示。结合原材料的市场供应情况,选择了三种不同直径的弹簧作为侧向弹性支撑,其中: k_{L} 为弹性支撑刚度(kN/m)。分别在试验梁的跨中和两边支座处共计布置 3 道横向加劲肋,以防止腹板发生局部屈曲。混凝土强度设计等级为 C50,浇筑完成的试验梁见图 2。

按《金属材料-拉伸试验方法》(GB/T 228—2010)中的相关要求,分别在试验梁的上翼缘钢管、腹板和下翼缘钢板上截取 3 个标准件进行单向拉伸材性试验,经拉伸试验获得的钢材的材料力

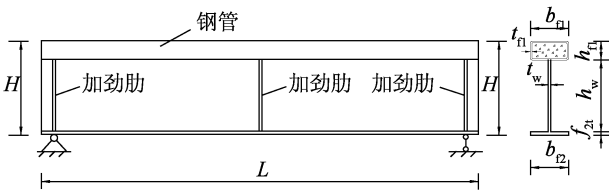


图 1 矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的几何参数

Fig. 1 Geometrical parameters of rectangular concrete-filled tubular flange I-shaped beams

表 1 试验梁实际尺寸

Tab. 1 Actual dimensions of experimental beams

试件编号	上翼缘的宽度×高度×厚度 $b_1 \times h_1 \times t_1 / \text{mm}$	腹板的高度×厚度 $h_w \times t_w / \text{mm}$	下翼缘的宽度×厚度 $b_2 \times t_2 / \text{mm}$	高度 H / mm	跨度 L / mm	支撑刚度 $k_L / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
CFRTFB-EB-1	58.82×37.92×2.46	244.66×5.90	61.02×5.92	288.5	4 000	25.0
CFRTFB-EB-2	58.24×36.50×2.46	250.62×6.09	61.16×5.88	293.0	4 000	47.4
CFRTFB-EB-3	58.70×38.14×2.46	246.64×6.04	62.26×6.22	291.0	4 000	50.0



图 2 浇筑完成的试验梁

Fig. 2 Experimental beams after casting



图 4 初始几何缺陷实测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of measured initial geometric defects

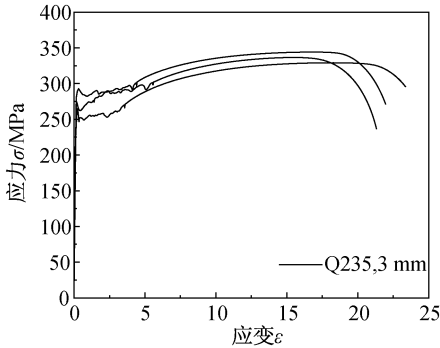


图 3 标准件的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of standard parts

学性能的应力-应变曲线关系如图 3 所示。标准件的各材性指标见表 2。

表 2 标准件材性指标

Tab. 2 Material property indexes of standard parts

名称	弹性模量 E_s / MPa	屈服强度 f_y / MPa	抗拉强度 f_u / MPa	屈强比 f_y / f_u	泊松比 ν
CFRTFB-EB	2.06×10^5	280.4	335.6	0.83	0.306

1.2 水平初始几何缺陷测量

初始几何缺陷是指梁在未受荷载作用前就存在于实际构件中的缺陷。此次试验初始几何缺

陷的实测示意图如图 4 所示。

在测量前,需将两个夹支座大致位于同一水平平面,同时对试验梁测点进行标记,测点与测点间距为 200 mm,测量由夹支座的左侧往右侧的方向测量。每个面的测点循环测量三次,并记下读数。根据实测数据确定的试件 CFRTFB-EB-1 平面外水平初始缺陷分布如图 5 所示,最终分析得出,试验梁最大的初始缺陷为跨度的 1/400。

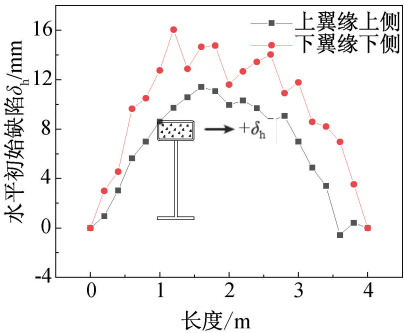


图 5 CFRTFB-EB-1 水平初始缺陷

Fig. 5 Horizontal initial defect of CFRTFB-EB-1

1.3 测点布置及加载方案

为测量试验梁的位移,分别在梁的 $L/4, L/2$

和 $3L/4$ 的位置共安装了 11 个位移计,如图 6 所示。由于上翼缘设置弹性支撑的影响,故只能在离跨中 300 mm 处布置应变片,记为 ST1—ST4, ST12—ST15, ST23—ST26,这一部分应变片用来测量截面不同高度处的应变,在上翼缘跨中截面管两侧分别布置应变片,记为 ST9 和 ST20,用来获得试验梁跨中管侧壁应变分布规律,在腹板上布置应变片,记为 SW5—SW8, SW10—SW11, SW16—SW19, SW21—SW22,用来获得腹板的横向应变规律。在跨中下翼缘布置应变片,记为 SF27—SF32,用来获得跨中下翼缘横向和纵向应变的变化规律。应变片的布置如图 7 所示。

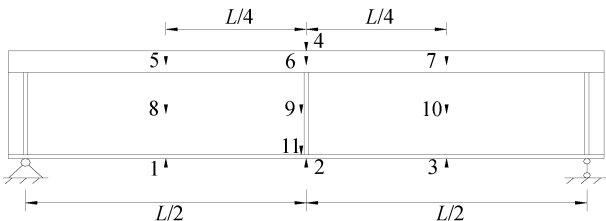


图 6 试验梁位移计布置图

Fig. 6 Experimental beam displacement meters layout diagram

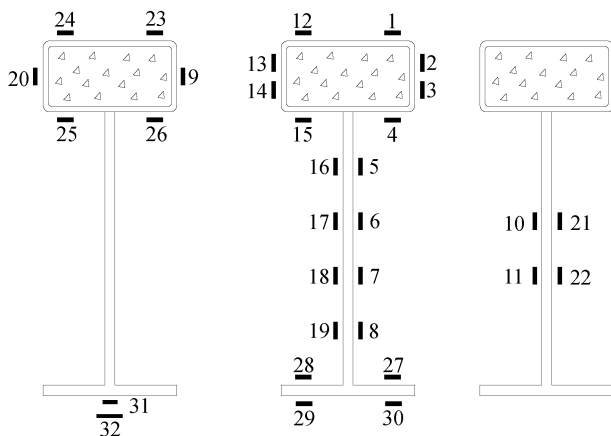
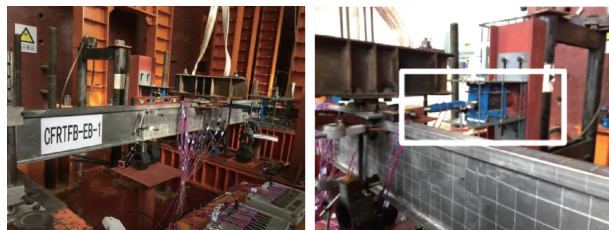


图 7 试验梁应变片的布置

Fig. 7 Strain gauges layout of experimental beams

试验的加载采用液压千斤顶进行分级加载,通过设置可旋转的球形刀铰凹槽,从而保证跨中集中荷载竖直向下。加载试验前,先进行两次预加载,以消除加载装置中可能存在的间隙。加载试验开始后,采用连续分级加载,在弹性段范围内,每级加载为预估极限荷载的 $1/10$,进入屈服阶段以后,再次缓慢施加荷载,每级加载为预估极限荷载的 $1/15$,每级荷载持续时间为 5 min,当试验梁要发生破坏时,减慢加载速度,使试验梁发生充分的塑性变形。试验梁加载如图 8 所示。



(a) 试验梁加载

(b) 弹性支撑装置

图 8 试验梁加载

Fig. 8 Loading of experimental beams

2 试验结果分析

2.1 破坏过程及破坏形态

所有试验梁的破坏形式均呈现出整体失稳破坏形态,符合试验的预期结果。由于试验梁的破坏过程基本类似,下面以 CFRTFB-EB-1 为例,介绍试验现象。试验加载初期,测量竖向位移的位移计读数呈线性增加,说明加载初期,试验梁主要发生平面内的弯曲变形,侧向位移并不明显。在竖向荷载达到 10 kN 之后,侧向位移逐渐增加,当荷载达到 44 kN 时,跨中附近上翼缘钢管内的混凝土出现劈裂的声音,荷载达到 46 kN 时,荷载不再增加,千斤顶的传感器读数不断下降,宣告此次试验结束,CFRTFB-EB-1 出现明显的侧向位移和截面扭转,即试验梁发生整体弯扭失稳,三根试验梁的破坏形态如图 9 所示。试验梁卸载后,跨中截面受压翼缘有明显的侧向位移以及扭转,试件具有明显残余变形,说明三根试验梁均发生弹性失稳。

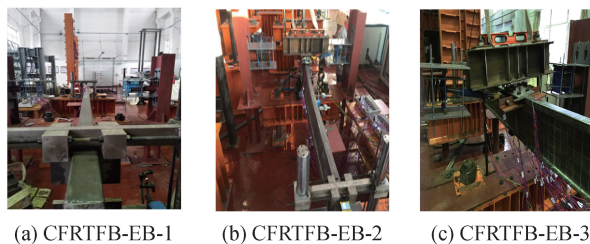


图 9 三根梁的弯扭屈曲破坏形态

Fig. 9 Failure modes of three beams under flexural-torsional buckling

2.2 荷载-位移曲线

为获得试验梁的变形发展规律绘制了荷载位移曲线如图 10(a) 所示,可以清晰地观察出,整个加载破坏过程分为三个阶段。即弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。加载初期,由于试验梁存在初始几何缺陷,竖向位移随荷载增大基本呈线性增长,随

着荷载的不断增加,刚度不断折减,竖向位移随荷载变化的非线性程度不断增加,当所施加荷载达到极值后,试验梁发生整体弯曲失稳。3 根试验梁在集中荷载作用下弯扭屈曲的稳定承载力 P_{cr} 以及三者之间的相对比值,如表 3 所示,可以看出,随着弹性支撑刚度的增加,试验梁的稳定承载力 P_{cr} 随之增大。弹性支撑刚度由 25 kN/m 增加至 47.4 kN/m 时,稳定承载力增加 8.7%,弹性支撑刚度由 47.4 kN/m 增加至 50 kN/m 时,稳定承载力增加 4%。

梁的弹性支撑位移曲线如图 10(b) 所示。从图中可以较为明显地看出,对于弹性支撑刚度为 25 kN/m 的 CFRTFB-EB-1 在竖向荷载为 30 kN 时

发生较大的弯扭变形,而对于弹性支撑刚度为 50 kN/m 的 CFRTFB-EB-3 在竖向荷载为 44 kN 时发生较大的弯扭变形,这表明设置弹性支撑能够有效延长矩形钢管混凝土翼缘工字形梁发生整体弯扭屈曲的失稳时刻。

2.3 荷载-应变曲线

为进一步描述试件的失稳特征,图 11 给出了试件荷载与应变的关系曲线。应变片读数的变化直接反映了截面的应变变化规律。在加载初期,上翼缘矩形管上表面边缘纵向应变片均处于弹性阶段,发生平面内的弯曲变形,翼缘的应变随荷载

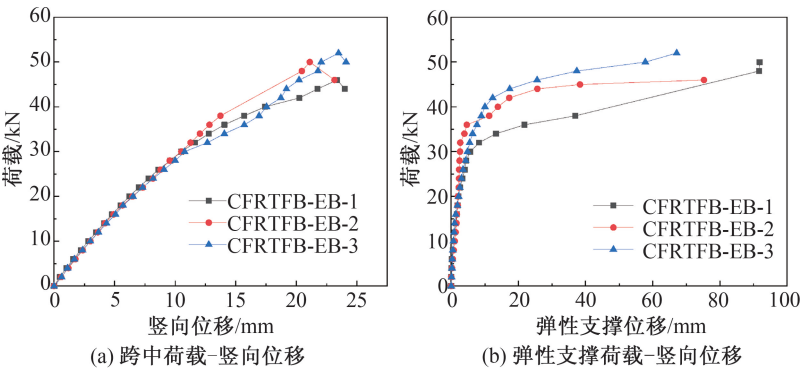


图 10 荷载-位移曲线
Fig. 10 Load-displacement curves

表 3 三根试验梁稳定承载力
Tab. 3 Stability bearing capacities of three experimental beams

试件编号	高度 H/mm	净跨 L/mm	支撑刚度 k_L $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	稳定承载力 P_{cr} $/\text{kN}$	比值
CFRTFB-EB-1	296	4 000	25.0	46	—
CFRTFB-EB-2	296	4 000	47.4	50	1.08
CFRTFB-EB-3	296	4 000	50.0	52	1.13

注:比值分别为 CFRTFB-EB-2 和 CFRTFB-EB-3 与 CFRTFB-EB-1 稳定承载力的比值。

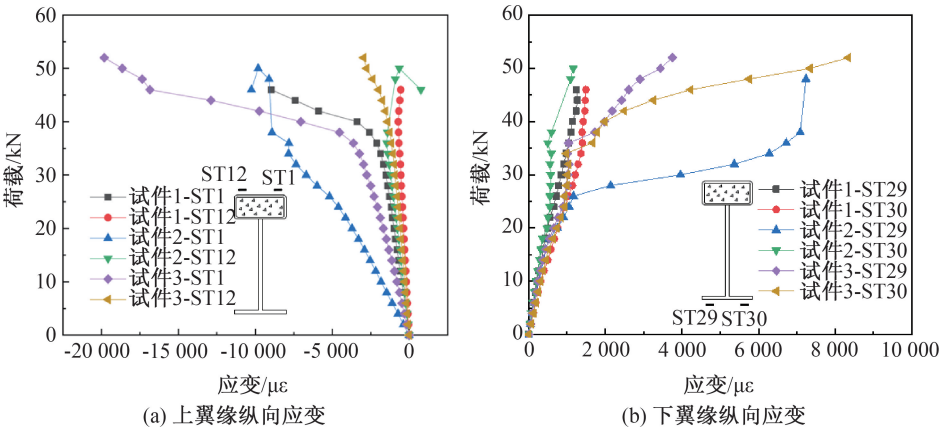


图 11 荷载-应变曲线
Fig. 11 Load-strain curves

的增大而呈线性增长,整个上翼缘矩形管上表面边缘纵向应变全部受压。当到达极限荷载后,ST1 应变片应变读数很大,说明已经屈服。而对于下翼缘下表面边缘纵向应变,从图 11(b)可以看出应变片 ST29 和 ST30 读数均为正,说明下翼缘下表面边缘纵向应变全部受拉。

3 模型验证

3.1 有限元模型的建立

采用 ANSYS 有限元软件对有弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁进行数值模拟^[18-21]。选用 SHELL181 单元模拟钢材, SOLID65 单元模拟钢管混凝土翼缘中的混凝土,选用 COMBIN14 弹簧单元模拟弹性支撑,通过设置 KEYOPT(2) 选项来定义其绕 z 轴的弹性弹簧,通过定义实常数确定弹性刚度 k_L 的取值。使用接触单元 CONTA173 和目标单元 TARGE170 模拟上翼缘钢管与混凝土之间的粘结力。CONTA173 单元又称之为 3D4 节点面面接触单元,适用于 3D 结构和耦合场的接触分析。采用 CERIG 命令来模拟刚周边,即沿梁跨度方向各截面建立绕 z 轴的约束方程,以保证截面变形前后形状不变。建立的有限元模型如图 12 所示。

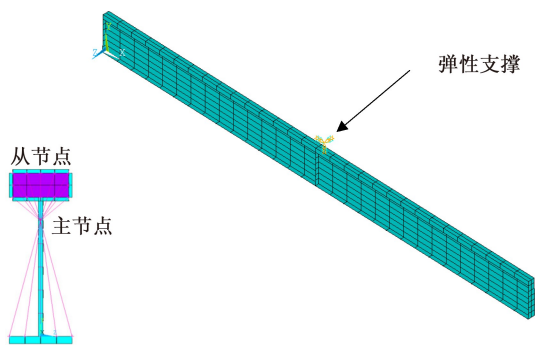


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

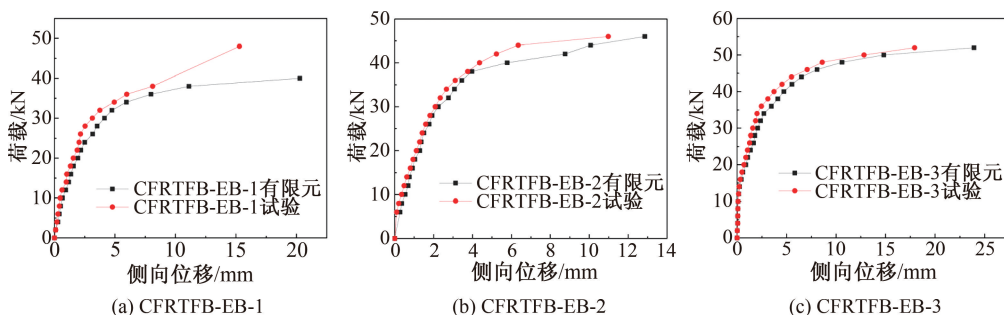


图 14 荷载-侧向位移曲线

Fig. 14 Load-lateral displacement curves

选取 CFRTFB-EB-3 进行弹塑性稳定分析,试件的整体失稳模式如图 13 所示,可以看出,有限元模拟得到的失稳模式与试验失稳模式基本一致。绘制的荷载-侧向位移曲线如图 14 所示。从图中可以看出,在加载弹性阶段,有限元与试验的曲线走势非常吻合,而在进入弹塑性阶段之后,有限元的稳定承载力曲线比试验值曲线略有降低,进一步说明有限元计算方法可以很好地模拟弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁实际受力过程,可为该类梁力学性能的进一步研究提供参考。

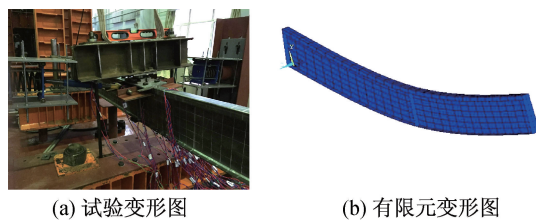


图 13 CFRTFB-EB-3 的弯扭屈曲破坏形态

Fig. 13 Failure modes of the specimen CFRTFB-EB-3 under flexural-torsional buckling

3.2 有限元模型的试验验证

本文分别对不设置弹性支撑、设置弹性支撑两种情况对应的梁的稳定承载力进行研究,分析弹性支撑对结构稳定承载能力的影响。由表 4 可知,设置支撑对结构稳定承载能力的提升程度为 40%,从而验证了设置弹性支撑可有效地提高该类梁的稳定承载力。3 根试件有限元计算值与试验值的比值分别为 1.01、0.98、0.98,平均误差在 5% 以内,表明有限元模拟方法可以较精确地预测带弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的承载力,可为后续的弹塑性稳定分析奠定基础。

矩形钢管混凝土翼缘梁的屈曲模式如图 15 所示。当梁发生弯扭屈曲时,由于梁受到竖直集中力作用而发生平面内弯曲变形,平面外如果没有可靠的侧向支撑会发生平面外屈曲。当不设置侧

表 4 试验结果和有限元结果对比

Tab. 4 Comparison of experimental results and finite element results

试件编号	有弹性支撑 试验值 P_{cr1}/kN	有弹性支撑 FEM 值 P_{cr2}/kN	无弹性支撑 FEM 值 P_{cr3}/kN	P_{cr1}/P_{cr2}
CFRTFB-EB-1	46	45.39	27.41	1.01
CFRTFB-EB-2	50	50.96	27.41	0.98
CFRTFB-EB-3	52	52.85	27.41	0.98

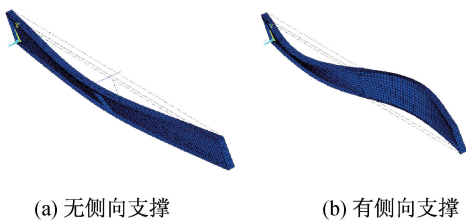


图 15 弯扭屈曲模式

Fig. 15 Flexural-torsional buckling modes

向支撑时,其屈曲模式类似于正弦半波,即对称屈曲。当设置侧向支撑并且刚度足够大时,屈曲模式为两个半波,即反对称屈曲。研究表明,设置侧向支撑对矩形钢管混凝土翼缘梁的屈曲模式有着显著影响。

4 参数分析

为进一步了解影响弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁稳定承载力的因素,选取两个不同截面尺寸的矩形钢管混凝土翼缘梁进行分析,简称为 CFRTFB-1、CFRTFB-2,其几何尺寸如表 5 所示,对两种截面的梁进行参数分析,获得混凝土强

度、上翼缘含钢率和腹板高厚比对弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的稳定承载力的影响规律。

4.1 混凝土强度的影响

矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的钢材屈服强度为 235 MPa,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.3,混凝土强度等级分别为 C40、C50 和 C60。不同混凝土强度情况下梁弯扭屈曲稳定承载力计算结果如图 16 所示。

从图 16 可以看出,对于有弹性支撑的矩形钢管混凝土翼缘工字形梁,随着混凝土强度的提高,其稳定承载力 P_{cr} 有一定程度的增大,这是因为混凝土对梁的影响主要体现在其弹性模量的变化上。当混凝土强度等级从 C40 增加到 C60 时,弹性模量的变化很小,承载力提高约 1.2%~5.5%,因此混凝土强度等级的变化对稳定承载力的影响很小。

4.2 上翼缘含钢率的影响

调整矩形钢管混凝土翼缘梁 CFRTFB-1、CFRTFB-2 的上翼缘钢管厚度,从而改变上翼缘的含钢率,进行参数分析时,钢材屈服强度为 Q235,

表 5 CFRTFB-1、CFRTFB-2 梁的几何尺寸

Tab. 5 Geometric dimensions of CFRTFB-1 and CFRTFB-2

试件编号	上翼缘的宽度×高度×厚度 $b_{f1}\times h_{f1}\times t_{f1}/\text{mm}$	腹板的高度×厚度 $h_w\times t_w/\text{mm}$	下翼缘的宽度×厚度 $b_{f2}\times t_{f2}/\text{mm}$	高度 H/mm	跨度 L/mm
CFRTFB-1	80×40×4	252×8	80×8	300	3 000
CFRTFB-2	120×60×5	380×10	120×10	450	6 750

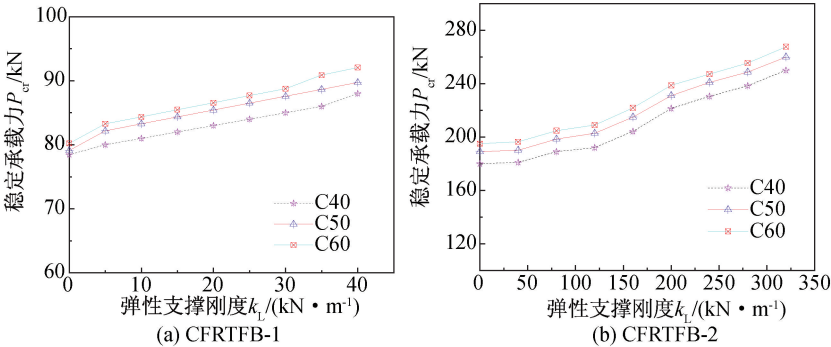


图 16 混凝土强度对稳定承载力的影响

Fig. 16 Influence of concrete strength on the stability bearing capacity

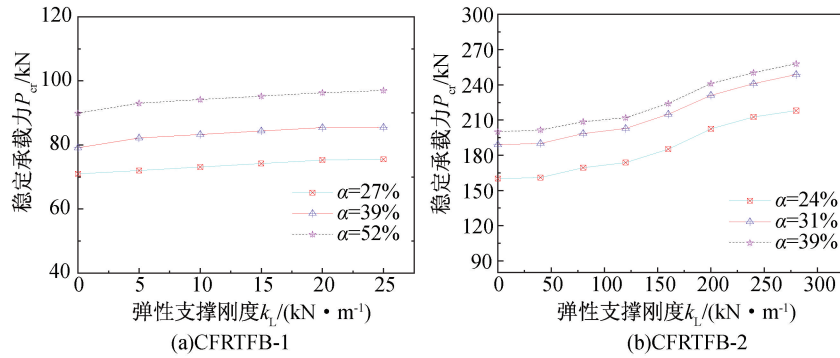


图 17 上翼缘含钢率对稳定承载力的影响

Fig. 17 Influence of steel ratio of top flange on the stability bearing capacity

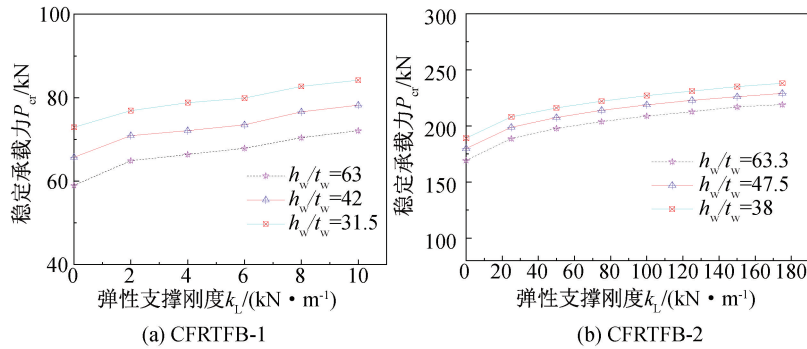


图 18 腹板高厚比对稳定承载力的影响

Fig. 18 Influence of web height-thickness ratio on the stability bearing capacity

混凝土强度等级为 C50,其他参数均不变。不同上翼缘含钢率情况下梁弯扭屈曲稳定承载力计算结果如图 17 所示。

从图 17 中可以看出,对于有弹性支撑的矩形钢管混凝土翼缘工字形梁,上翼缘钢管壁越厚,含钢率越高, P_{cr} 显著增加,含钢率由 24% 提高到 52% 时, P_{cr} 提高约 5%~30%,说明上翼缘含钢率对 CFRTFB 梁的稳定承载力影响较大。因此在工程实践中,可以适当增加翼缘厚度来提高矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的整体稳定性。

4.3 腹板高厚比的影响

改变 CFRTFB-1、CFRTFB-2 腹板的厚度,从而调整腹板高厚比,钢材屈服强度为 Q235,混凝土强度等级为 C50,其他参数均不变。不同腹板高厚比情况下梁弯扭屈曲稳定承载力计算结果如图 18 所示。

从图 18 中可以看出,随着腹板高厚比的减小,其稳定承载力 P_{cr} 明显增大,对于梁 CFRTFB-1 腹板高厚比从 63 减小到 31.5 时, P_{cr} 增大约 18%~27%,对于梁 CFRTFB-2 腹板高厚比从 63.3 减小到 38 时, P_{cr} 增大约 5.5%~20%。由此可见,腹板

高厚比相较于混凝土强度对稳定承载力的影响更为显著。腹板高厚比越大,意味着矩形钢管混凝土翼缘工字形梁越容易失稳。

5 结论

本文通过对集中荷载作用下带有弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的稳定性能进行试验和数值模拟研究,得到如下结论:

1) 通过试验得出的荷载-位移曲线发现,整个加载破坏过程分为三个阶段,即弹性阶段、弹塑性阶段和破坏阶段。钢管混凝土翼缘工字形梁失稳时的稳定承载力随着弹性支撑刚度增加而增大,弹性支撑刚度由 25 kN/m 增加至 47.4 kN/m 时,承载力增加 8.7%,弹性支撑刚度由 47.4 kN/m 增加至 50 kN/m 时,承载力增加 4%。通过荷载-应变曲线发现,在加载初期,翼缘应变保持线性增长,加载后期,三根试验梁均发生了弹塑性弯扭屈曲破坏。

2) 采用 ANSYS 有限元软件,分别建立不设置弹性支撑和设置弹性支撑两种情况下的数值模型,对比其屈曲模态和整体稳定承载力,分析得出,试验结果与有限元结果的最大误差为 1.92%,说明有限元模型能够很好地预测带有弹性支撑矩

形钢管混凝土翼缘工字形梁稳定承载力。此外,当结构不设置侧向支撑时,其屈曲模式为对称屈曲,当设置侧向支撑并且刚度足够大时,其屈曲模式为反对称屈曲,表明侧向支撑对矩形钢管混凝土翼缘梁的屈曲模式有显著影响。支撑对结构稳定承载力的提升程度约为40%,表明设置弹性支撑对结构稳定承载力的影响显著。

3)在设计矩形钢管混凝土翼缘工字形梁时,混凝土强度的增加在一定程度上可提高该类梁的稳定承载力,而增加上翼缘含钢率和减小腹板高厚比可较明显地提高梁的稳定承载力,这可为工程设计和施工提供参考。

参考文献:

- [1] 计静,徐智超,姜良芹,等. 矩形钢管混凝土翼缘-蜂窝钢腹板H形截面组合短柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(09): 63-73.
- [2] JI J, HE L, JIANG L, 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.
- [3] 李华,黎立云. 钢管混凝土组合节点的非线性有限元分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2010, 27(01): 25-28+37.
- [4] SAUSE R. Innovative steel bridge girders with tubular flanges[J]. Design, Assessment, Monitoring and Maintenance of Bridges and Infrastructure Networks, 2020: 38-53.
- [5] SAUSE R, KIM B, WIMER M R. Experimental study of tubular flange girders[J]. Journal of structural Engineering, 2008, 134(3): 384-392.
- [6] 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.
- [7] JI J, LI Y, JIANG L, et al. Flexural behavior of composite beams with concrete filled steel tube flanges and honeycombed steel webs[J]. Frontiers in Materials, 2022, 9: 991584.
- [8] SHAO Y B, MOHAMED H S, WANG L, et al. Experimental and numerical investigation on stiffened rectangular hollow flange beam[J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(05): 1564-1581.
- [9] 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.
- [10] 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: 1161-1173.
- [11] 张文福,严威,刘迎春. 基于板-梁理论的集中荷载下带侧向弹性支撑矩形钢管混凝土翼缘工字形梁的弯扭屈曲分析[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(06): 61-70.
- [12] 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.
- [13] GAO F, YANG F, ZHU H, 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.
- [14] LEE H E, NGUYEN C T, MOON J H, et al. Lateral-torsional buckling of discretely-braced I-girder[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 264-271.
- [15] 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: 839-848.
- [16] BEYER A, BUTEAU A. Simplified method for lateral-torsional buckling of beams with lateral restraints: Evaluation of the existing Eurocode 3 approach[J]. Steel Construction, 2019, 12(4): 318-326.
- [17] KIM B G, SAUSE R. Study of two-span continuous tubular flange girder demonstration bridge[J]. Lehigh University, Bethlehem, Palestine, 2008.
- [18] JI J, XU Z, JIANG L, 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: 1153-1166.
- [19] 郝增明,白晓宇,章伟,等. 双腹板工字型GFRP腰梁连接受力性能研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(02): 21-26.
- [20] 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.
- [21] JI J, ZHANG Z B, LIN M F, et al. Structural application of engineered cementitious composites (ECC): A state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2023, 406: 133289.

(责任编辑 周雪梅)