

文章编号:2095-1922(2024)06-0961-12

doi:10.11717/j.issn:2095-1922.2024.06.01

工字形 CFRP-高强圆钢管高强混凝土 中长柱偏心受压性能研究

李帼昌,王宁波,李 晓

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 为避免材料浪费,减小构件截面尺寸,将 CFRP 型材与高强圆钢管高强混凝土进行结合,形成工字形 CFRP 型材-高强圆钢管高强混凝土构件,并研究其在偏心受压状态下的力学性能。**方法** 采用试验和有限元相结合的方法对组合构件的工作机理和破坏模态进行研究,选取典型构件进行受力全过程以及变参数分析。**结果** 典型构件荷载-挠度曲线可分为弹性段、弹塑性段、塑性强化段和下降段;CFRP 型材在弹塑性段后承担荷载比例逐渐增加且能够与钢管协同工作,对混凝土形成双重约束,提高构件的极限承载力;长细比、偏心率对构件的极限承载力、初始刚度、延性影响较为明显,钢材屈服强度、混凝土强度、含钢率、CFRP 配置率影响较小。**结论** 试件受力过程中变形较为稳定,延性较好,试件的变形符合平截面假定。

关键词 工字形 CFRP 型材;高强圆钢管;高强混凝土;偏心受压

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:李帼昌,王宁波,李晓.工字形 CFRP-高强圆钢管高强混凝土中长柱偏心受压性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):961-972. (LI Guochang, WANG Ningbo, LI Xiao. Mechanical behavior of I-shaped CFRP profiles-high-strength concrete-filled high-strength circular steel tube middle-long columns under eccentric loading[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(6):961-972.)

Mechanical Behavior of I-shaped CFRP Profiles-high-strength Concrete-filled High-strength Circular Steel Tube Middle-Long Columns under Eccentric Loading

LI Guochang, WANG Ningbo, LI Xiao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To avoid material waste and reduce the section size of the member, CFRP profiles and high-strength concrete-filled high-strength circular steel tube is combined to form I-shaped CFRP profiles-high-strength concrete-filled high-strength circular steel tube, and their mechanical performance under eccentric compression are studied. The working mechanism and failure mode of

收稿日期:2023-02-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51938009)

作者简介:李帼昌(1964—),女,教授,博士研究生导师,主要从事钢结构、组合结构等方面研究。

the composite members were studied by the combination of test and finite element method. The typical members were selected for the whole process analysis and variable parameter analysis. The results showed that the load-deflection curve of typical members can be divided into an elastic section, elastic-plastic section, plastic strengthening section, and descending section. The proportion of load borne by CFRP profiles after the elastic-plastic section gradually increases and can work together with the steel tube, forming double constraints on the concrete and improving the ultimate bearing capacity of the members. The slenderness ratio and eccentricity have an obvious influence on the ultimate bearing capacity, initial stiffness, and ductility of the members, while the steel yield strength, concrete strength, steel ratio, and CFRP configuration rate have little influence. The deformation of the specimen is stable and the ductility is good, and the deformation of the specimen conforms to the plane section assumption.

Key words: I-shaped CFRP profiles; high strength circular steel tube; high strength concrete; eccentric loading

钢管混凝土因其优越的力学性能和施工便捷性被广泛应用于建筑及桥梁工程当中,钟善桐^[1]、韩林海^[2]等已对钢管混凝土的力学性能做了较为系统的研究。近年来,随建筑结构向大跨度、超高层等方向发展,采用普通强度的钢管混凝土将造成构件截面尺寸过大和材料浪费。将高强混凝土填充至高强钢管形成高强钢管高强混凝土组合构件,既能减轻自重,增加建筑物使用面积,又能够延缓钢管的局部屈曲、改善高强混凝土的脆性^[3-4]。我国已出台相关规程^[5],可用来指导高强钢管高强混凝土构件的研究与应用。

在实际工程中,竖向荷载的不均匀分布会造成组合柱处于偏心受压状态,对采用高强材料的钢管混凝土柱在偏压状态下的力学性能研究显得格外重要。J. M. Portolés等^[6]、S. H. Lee等^[7]分别对高强圆钢管混凝土细长柱、短柱进行了偏心受压试验研究;罗霞等^[8]对10根高强钢管超高强混凝土偏压短柱进行了试验研究;R. Zhang等^[9]对方和圆截面的钢管超高强混凝土偏压长柱进行了试验及有限元模拟研究;G. C. Li等^[10-11]对高强钢管高强混凝土偏压短柱以及中长柱进行了试验和有限元模拟研究。上述研究表明:加入高强或超高强混凝土后组合柱承载力明显提升,同时使用高强钢材和高强混凝土的构件表现出了较好的延性。目前,对采用单

一高强度材料和双高强材料的钢管混凝土柱已有部分研究。

为进一步提升组合柱的力学性能,减轻自重,纤维复合材料FRP被国内外学者所青睐。FRP由于其质量轻、高强度、耐疲劳、耐腐蚀等诸多特点被广泛用于土木建筑行业中^[12],许多FRP与钢管混凝土组合的结构类型也随之出现。J. J. Zeng等^[13]以偏心率、长细比以及PET FRP厚度为变化参数,对PET FRP约束高强钢管混凝土柱进行了试验研究;J. L. Yang等^[14]对CFRP-钢复合钢管钢管骨高强混凝土柱进行了偏心受压试验研究;郎葵等^[15]对内置CFRP圆管的方钢管混凝土轴压及双向偏压短柱进行了试验和有限元模拟研究;J. F. Wang等^[16]对CFRP全包裹和部分包裹下的钢管混凝土短柱进行了偏心受压试验研究。以上研究表明:不同形式的FRP材料与钢管混凝土进行组合之后,其力学性能均得到了明显的改善。

在对FRP材料和钢管混凝土大量研究的基础上,笔者所在科研团队提出了工字形CFRP型材-钢管混凝土组合构件,该组合构件充分利用了钢材、混凝土、CFRP型材的材料性能,使其达到“1+1+1>3”的效果^[17]。目前,对工字形CFRP型材-高强钢管高强混凝土柱的研究主要集中于方形截面上,缺少偏心受压下圆截面组合柱的研究。

鉴于此,笔者采用试验与有限元相结合的方法对工字形 CFRP 型材-高强圆钢管高强混凝土偏压中长柱的破坏模态和工作机理进行研究,并选取典型构件进行受力全过程分析和参数分析,以明确该组合构件在偏心受压状态下的力学性能。研究表明:所有试件均出现较大的侧向位移,发生弹塑性失稳破坏,延性较好;偏心率越大,试件中性轴初始位置越靠近受压侧,但受力过程中移动越缓慢,试件变形符合平截面假定。

1 试验方案设计及结果

1.1 试验概况

本试验共设计了 9 根工字形 CFRP 型材-高强圆钢管高强混凝土偏压中长柱。钢管选用高强钢材 Q550、Q770、Q890,混凝土

采用 C100 商品混凝土,钢材屈服强度及混凝土立方体抗压强度实测值见表 1。试件截面为圆形截面,外径 183 mm,钢管厚度 5 mm,CFRP 规格为 60 mm × 70 mm × 6 mm,试件横截面及三维示意图如图 1 所示。试件参数汇总于表 1,图 2 为试件加载装置与测量位置示意图。

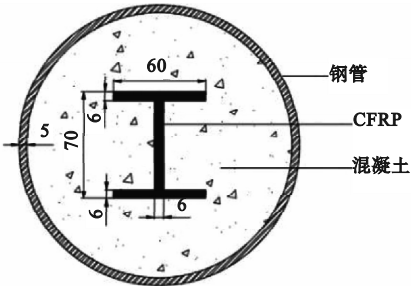


图 1 试件横截面示意图

Fig. 1 The cross-section diagram of the specimen

表 1 试件编号及参数汇总

Table 1 Summary of parameters for numbered specimens

编号	$d \times t \times L/\text{mm}$	f_y/MPa	f_{cu}/MPa	e/r	λ	N_u/kN
1-HCFHCST-CFRP-E10	183 × 5 × 1220	782.18	103.26	0.11	26.67	4 543.61
1-HCFHCST-CFRP-E30	183 × 5 × 1220	782.18	103.26	0.33	26.67	3 528.53
1-HCFHCST-CFRP-E50	183 × 5 × 1220	782.18	103.26	0.55	26.67	2 835.45
1-HCFHCST-CFRP-E70	183 × 5 × 1220	782.18	103.26	0.77	26.67	2 228.34
2-HCFHCST-CFRP-E50	183 × 5 × 1220	842.68	103.26	0.55	26.67	2 838.66
3-HCFHCST-CFRP-E50	183 × 5 × 1220	490.11	103.26	0.55	26.67	2 207.17
4-HCFHCST-CFRP-E30	183 × 5 × 1830	782.18	103.26	0.33	40.00	2 908.43
4-HCFHCST-CFRP-E50	183 × 5 × 1830	782.18	103.26	0.55	40.00	2 217.85
4-HCFHCST-CFRP-E70	183 × 5 × 1830	782.18	103.26	0.77	40.00	1 784.69

注:以编号为 1-HCFHCST-CFRP-E30 的试件为例,1 仅代表数字编号,HCFHCST-CFRP 代表工字形 CFRP 型材-高强圆钢管高强混凝土,E30 代表该试件偏心距为 30 mm; d 、 t 、 L 分别为圆截面直径、钢管壁厚和试件长度; f_y 、 f_{cu} 分别为钢材屈服强度和混凝土立方体抗压强度实测值; e/r 为偏心率, e 、 r 分别为偏心距和半径, $r = d/2$; λ 为长细比,取 $4L/d$; N_u 为构件的峰值荷载。

1.2 试验现象及破坏模态

9 个试件在试验过程中的试验现象基本类似,现以试件 1-HCFHCST-CFRP-E50 为例进行分析。加载初始阶段以每级 200 kN 的荷载量进行分级加载,由于试件初始偏心率较大,在初始加载阶段,中截面受拉侧最外边缘即受到拉力作用,加载至 1 045 kN ($0.37N_u$),出现短暂且微弱的混凝土开裂响

声,加载至 2 069 kN ($0.73N_u$),再次出现混凝土开裂响声。在加载至 2 100 kN ($0.74N_u$)之前,试件的荷载-挠度曲线呈线性发展,承载力达到 2 100 kN,试件挠度约为 7.30 mm,荷载-挠度曲线出现轻微弯曲,证明试件已经屈服,在此刻由分级加载转换为 0.006 mm/s 的连续加载。承载力达 2 650 kN ($0.93N_u$),出现混凝土被压碎的连

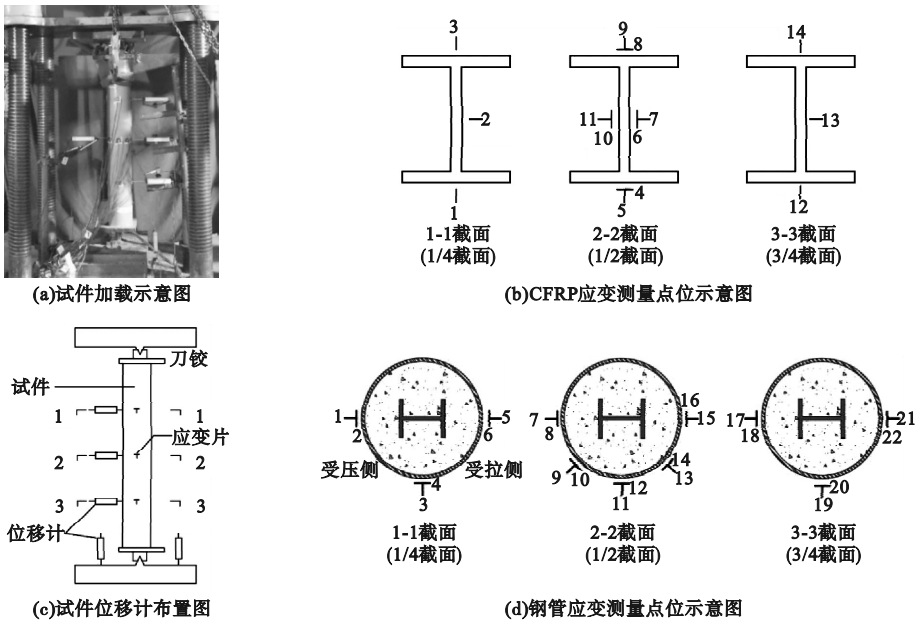


图2 试件加载装置及测量点布置示意图

Fig. 2 The loading device of the specimen and the schematic diagram of the measurement points arrangement

续响声,加载至极限荷载2 835.45 kN,试件的挠度发展至16.33 mm为试件屈服时的2.24倍,且 $L/2$ 截面附近出现一处轻微鼓曲。进入荷载下降段后,试件二阶效应影响加剧,挠度迅速发展, $L/3$ ~ $L/2$ 截面附近出现两处不同程度的鼓曲,如图3(b)所示。除此之外,在荷载下降期间伴有轻微的CFRP纤维断裂声,直至承载力下降到 $0.85 N_u$,试验结束。

试验过程中所有试件均出现较大的侧向

位移,发生弹塑性失稳破坏,延性较好。所有试件在其受压侧 $L/3 \sim L/2$ 处出现了不同程度的鼓曲。整体而言,在偏心率相同时,长细比为26.67的试件鼓曲较为严重,而在长细比相同的情况下,偏心率越大试件鼓曲越严重,全部试件的破坏模态如图3所示。由于混凝土的离散型1-HCFHCST-CFRP-E70、1-HCFHCST-CFRP-E50在 $L/2$ 附近出现两处鼓曲、4-HCFHCST-CFRP-E30在 $L/2$ 和 $L/3$ 附近各出现一处鼓曲。

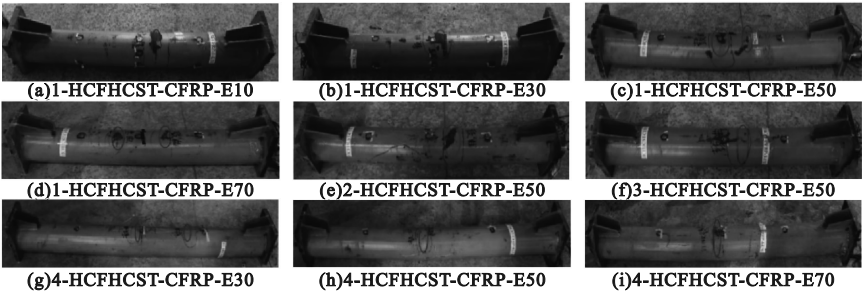


图3 试件的破坏模态

Fig. 3 Failure mode of the specimens

1.3 侧向挠度分布规律分析

图4为HCFHCST-CFRP偏压中长柱在不同受力阶段的侧向挠度分布曲线。整体而

言,在5个受力阶段内,沿柱高方向四等分点 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 的侧向挠度分布与正弦曲线基本一致,表明HCFHCST-CFRP偏压中长

柱在受力过程中能够承担相应的压力和弯矩,没有出现试件形态突然改变的状况,试件延性较好。试件在加载至 $0.8 N_u$ 之前,侧向挠度发展较为缓慢,加载至 $0.8 N_u$ 之后,受压侧钢管屈服,各个位置处的挠度均得到明

显发展。例如,试件 4-HCFHCST-CFRP-E50 在前四级荷载作用下,中截面挠度分别为 2.91 mm、5.97 mm、9.33 mm、13.94 mm,当承载力发展至峰值荷载 N_u ,试件挠度达到 27.16 mm,为前一级荷载的 1.95 倍。

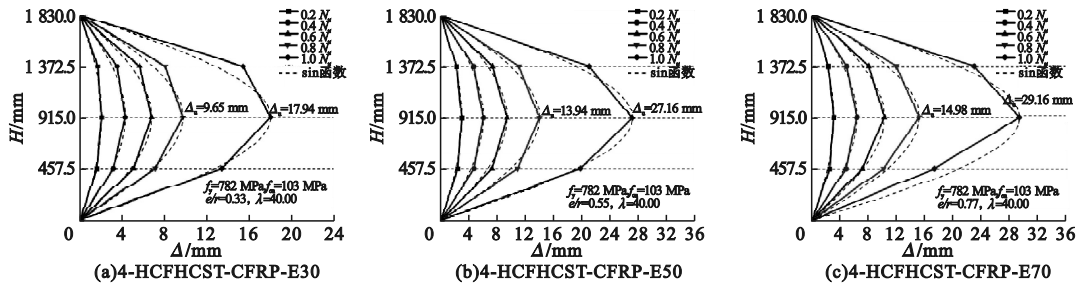


图4 试件不同受力阶段的侧向挠度分布曲线

Fig. 4 The lateral deflection distribution curves of the specimens at different stress stages

1.4 钢管中截面纵向应变分析

图5为钢管纵向应变沿中截面高度分布曲线。由图5(a)可见,试件在加载至 $0.8 N_u$ 之前,中性轴移动幅度较小;加载从 $0.2 N_u$ 至 $0.8 N_u$,中性轴仅移动26.39 mm。承载力达到 $0.8 N_u$ 之后,钢管发生屈服,试件挠度发展较快,混凝土出现破碎,导致受拉和受压侧应变增长速率加快,中性轴不断向受压侧移动。加载从 $0.8 N_u$ 至 N_u ,中性轴移动了22.28 mm,为加载从 $0.2 N_u$ 至 $0.8 N_u$ 时的84.43%。

随偏心率增大,中性轴初始位置向受压侧移动,但受力过程中,偏心率越大的试件,其中性轴移动越缓慢,如图5(a)、(b)、(c)所示。试件承载力为 $0.2 N_u$,其中性轴位置依次为-86.46 mm、-52.49 mm、-38.07 mm,加载从 $0.2 N_u$ 至 N_u ,三个试件的中性轴分别向受压侧移动了46.67 mm、24.96 mm、13.16 mm。

随偏心率增加,试件受压区减小,受拉区

综上所述,试件中性轴的初始位置随偏心率的增加逐渐靠近受压侧,在受力过程中,随承载力的增加,中性轴不断向受压区移动,试件变形在 N_u 之前符合平截面假定。

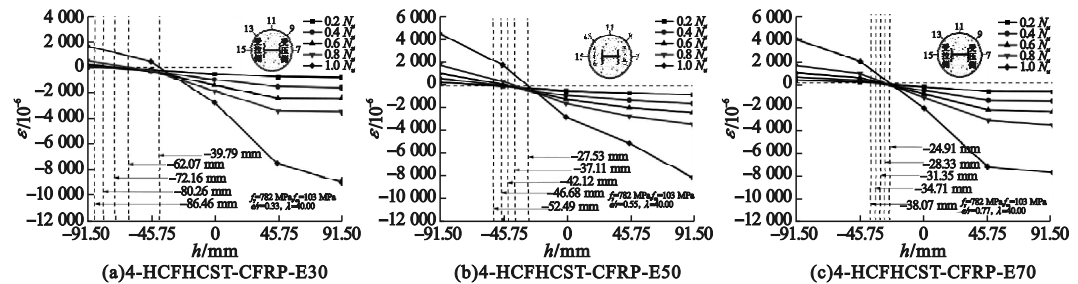


图5 钢管应变沿中截面高度分布曲线

Fig. 5 The distribution curves of steel tube strain along mid-height section

2 有限元模型的建立

2.1 材料本构关系选取

高强钢材本构关系选用韩林海教授提出

的高强钢材二折线强化模型^[2]。混凝土受压本构模型选用刘威提出的混凝土应力-应变等效关系模型^[18],并采用应力-断裂能关系^[10]定义混凝土受拉模型。CFRP 损伤失效

采用基于 ABAQUS 有限元分析软件二次开发 USDFLD 子程序,并根据 Tsai-wu 强度失效准则判别材料失效,用渐进损伤定义材料有限刚度退化。

2.2 接触关系、边界条件和网格划分

端板、钢管、混凝土均采用 C3D8R 单元,CFRP 型材采用 SC8R 单元。钢管与混凝土间存在微小滑动,接触面法线方向采用硬接触,切线方向用库伦摩擦模型模拟两者间的相对滑移,摩擦系数取 0.6^[19]。试验研究表明,混凝土与 CFRP 型材之间几乎不存在相对位移,接触关系可定义为 Tie 绑定约束。CFRP 型材与端板、钢管与端板之间分别采用硬接触和绑定约束。将加载点耦合在刚性端板的加载位置上,模型两端设为铰接,构件的接触关系、边界条件以及网格划分如图 6 所示。

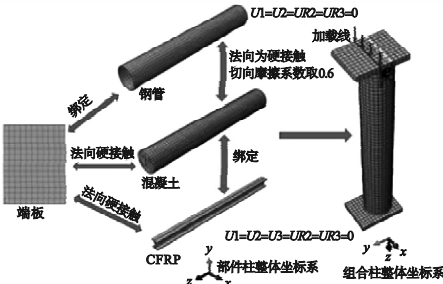


图 6 接触关系及边界条件示意图

Fig. 6 The schematic diagrams of contact relationship and boundary conditions

2.3 模型验证

为验证笔者所建有限元模型的合理有效性,采用上述建模方法对试验的 9 个偏压试件进行了模拟对照分析,如图 7 所示。由图 7 可知,试验和模拟的荷载-挠度曲线吻合较好,且两者承载力最大相差 96.43 kN

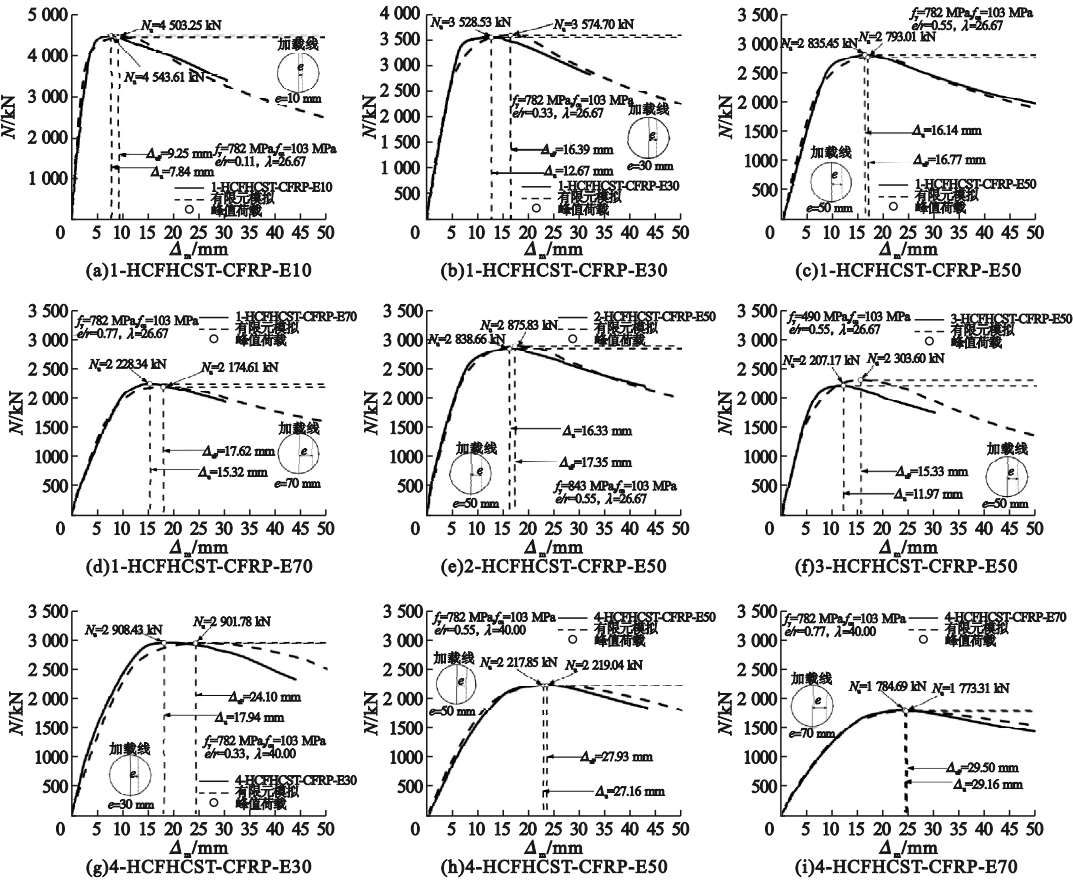


图 7 试验与模拟荷载-挠度曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-deflection curves between test and simulation

(4.2%),最小相差 1.19 kN(0.1%),9 个偏压试件的极限承载力试验值与模拟值之比均值为 0.999、方差 0.000 34,证明了笔者所建有限元模型的有效性,可进行后续研究。

3 有限元计算结果分析

3.1 受力全过程分析

选取试件 1-HCFHCST-CFRP-E50 为典型构件进行受力全过程分析。典型构件各材料分担荷载百分比见表 2,荷载-挠度曲线($N-\Delta_m$)如图 8 所示。

表 2 各材料分担荷载百分比

Table 2 The ratio of load shared by each material

材料类别	分担荷载占比/%			
	特征点 A	特征点 B	特征点 C	特征点 D
混凝土	57.92	59.21	67.15	65.27
钢管	34.51	34.84	24.76	25.81
CFRP	5.77	5.95	8.09	8.92

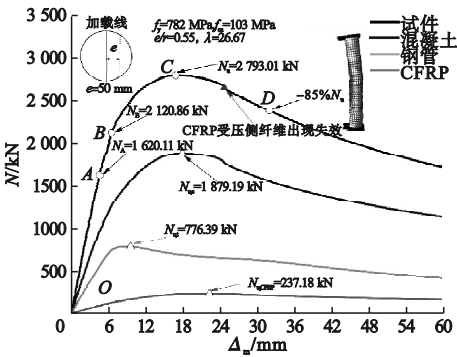


图 8 1-HCFHCST-CFRP-E50 $N-\Delta_m$ 曲线

Fig. 8 The $N-\Delta_m$ curve of 1-HCFHCST-CFRP-E50 specimen

$N-\Delta_m$ 曲线可分为如下四个阶段:

- (1)弹性段(OA):在此阶段,钢管、混凝土、CFRP 型材 $N-\Delta_m$ 曲线呈线性关系,表明三者均为单独受力。在特征点 A 处,受压侧钢管最大应力达到比例极限,构件承载力达到 $0.58N_u$,钢管、混凝土、CFRP 承担荷载比例为 1:1.73:0.17。
- (2)弹塑性段(AB):A 点以后,钢管开始对混凝土产生微弱约束,发展至特征点 B,构件

- 的承载力达到 $0.76N_u$,受压侧钢管发生屈服,而受拉侧仍处于弹性状态。构件 $N-\Delta_m$ 曲线不再呈线性发展,钢管对混凝土的约束增强。在 B 点,钢管、混凝土、CFRP 型材承担荷载比例为 1:1.70:0.17,钢管承担荷载占比达到最大。
- (3)塑性强化段(BC):B 点过后,构件挠度随荷载的增加发展较快,钢管塑性变形由受压区向受拉区发展,CFRP 型材开始发挥作用。在特征点 C 处,构件达到峰值荷载,受压侧混凝土在钢管和 CFRP 型材的双重约束下,最大压应力远超其抗压强度,达到 $1.82f_c$ 。在 C 点,钢管承担荷载比例减小,混凝土、CFRP 型材承担荷载比例增加,三者承担荷载比例为 1:2.71:0.33。
- (4)下降段(CD):随构件挠度不断增加,承载力快速下降,钢管中截面塑性区域不断扩大,CFRP 型材在达到最大承载力之后,受压侧翼缘纤维出现失效。在特征点 D 处,构件承载力下降至 $85\%N_u$,发生失稳破坏,钢管、混凝土、CFRP 型材三者承担荷载的比例为 1:2.53:0.35。CFRP 型材在 B 点过后承担荷载比例逐渐增大,表明 CFRP 型材主要在塑性强化段和下降段发挥作用。

图 9 为钢管中截面 Mises 应力等势图。由于试件的初始偏心率,在特征点 A,钢管的拉、压状态明显且两侧应力相差较大,受压侧钢管应力达到 606.4 MPa 为受拉侧的 2.56 倍。A 点过后钢管开始对混凝土产生微弱约束,发展至特征点 B,受压侧钢管率先达到屈服,混凝土受到的约束增强。B 点过后,受压侧最外边缘钢管开始发展塑性,应力增长较为缓慢,中性轴向受压区偏移,导致钢管受拉区增大,受压区减小,拉应力迅速发展,到达特征点 C,钢管受拉侧最外边缘 Mises 应力增加至 797.6 MP 并达到屈服。在下降段(CD),构件中截面挠度发展较快,二阶效应影响加剧,中性轴不断向受压区移动,到达特征点 D,钢管中截面大部分处于屈服状态,至此钢管退出工作,构件发生失稳破坏。

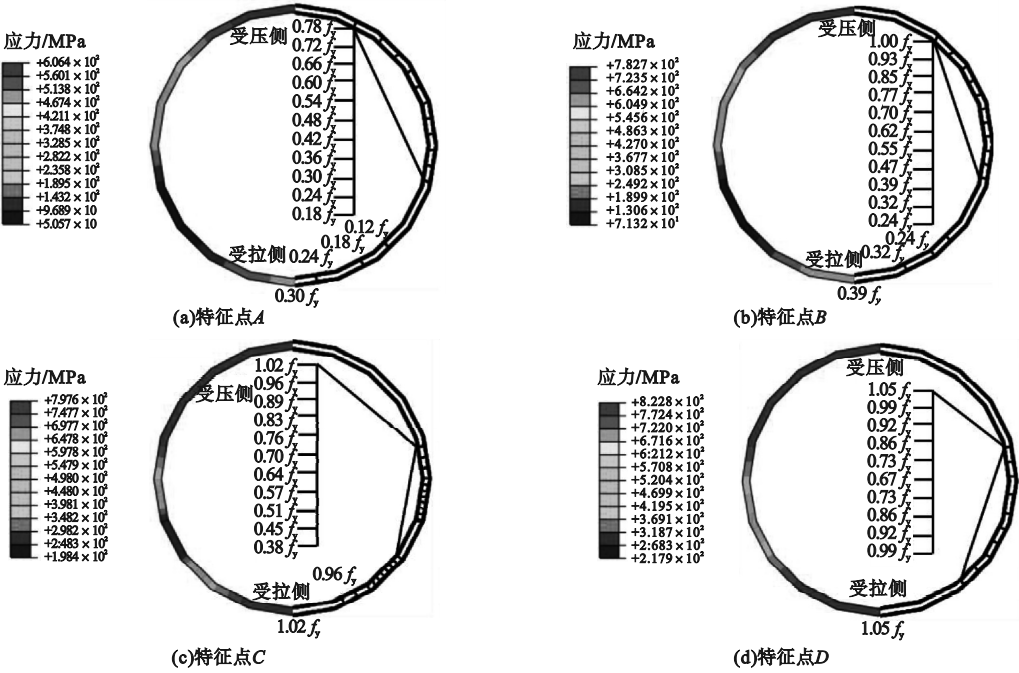


图9 钢管中截面 Mises 应力等势图

Fig. 9 Mises stress equipotential diagram at mid-height section of steel tube

图 10 为混凝土中截面纵向应力等势线图。在弹性段 (OA) 和弹塑性段 (AB) 内, 钢管和 CFRP 对混凝土的影响较小, 混凝土应力分布较为均匀; 在特征点 A 处, 钢管开始

对混凝土产生约束, 使混凝土处于三向受压状态, 受压侧混凝土最大应力达 $-1.02 f_c$, 已超过其抗压强度。在特征点 B 处, 受压侧钢管屈服, 同时 CFRP 型材开始发挥作用, 钢管

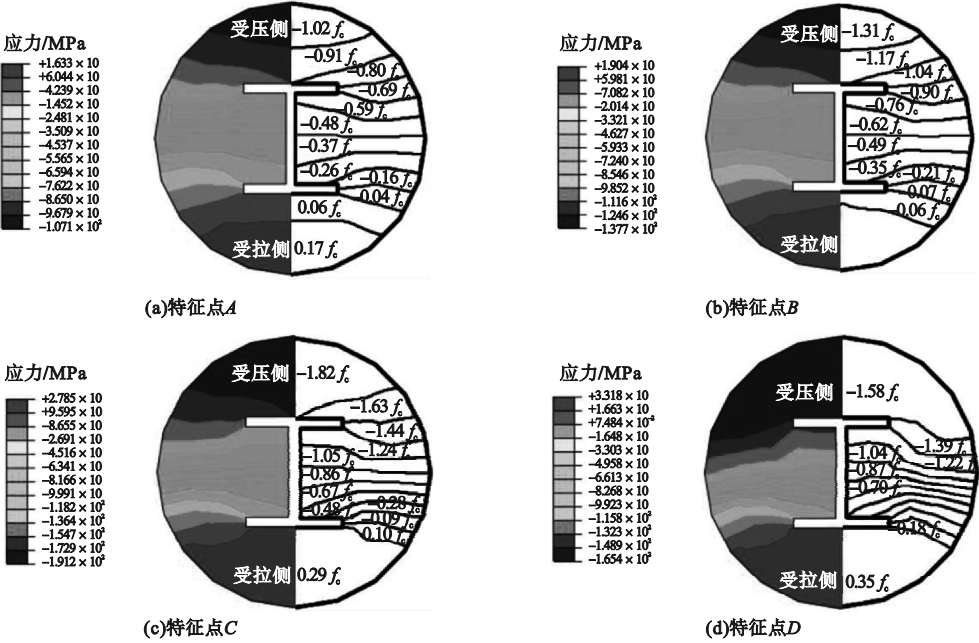


图 10 混凝土中截面纵向应力等势图

Fig. 10 Longitudinal stress equipotential diagram of concrete at mid-height section

和 CFRP 型材共同约束混凝土,混凝土的应力进一步提升。 B 点过后,混凝土纵向应力开始呈现不均匀分布,混凝土在钢管和 CFRP 型材的双重约束下纵向应力大幅度增加,发展至特征点 C ,受压侧最外边缘混凝土的应力达到 $-1.82 f_c$ 。 C 点过后,受压侧混凝土被压碎,纵向应力开始减小,到达特征点 D ,其纵向应力减小至 $-1.58 f_c$ 。

4 参数分析

以典型构件作为基准模型,对构件的混凝土强度 f_{cu} 、含钢率 α 、钢材屈服强度 f_y 、偏心率 e/r 、长细比 λ 、CFRP 配置率 ρ 六个关键影响因素进行了参数分析,并总结出不同参数影响下的构件力学性能变化规律。定义构件延性系数^[6]:

$$DI = \frac{d(0.85N_{\max})}{d(N_{\max})}$$

(1)

式中: $d(N_{\max})$ 、 $d(0.85 N_{\max})$ 分别为峰值荷载和峰值荷载后承载力下降至 $85\% N_u$ 时构件的纵向变形。

4.1 混凝土立方体抗压强度

f_{cu} 影响下的 $N-\Delta_m$ 曲线如图 11 所示。当 f_{cu} 从 60 ~ 120 MPa 变化,构件的极限承载力依次提升 6.07%、5.41%、4.92%、4.44%、4.11%、3.79%,初始刚度依次提升 4.55%、4.02%、3.28%、2.92%、2.66%、2.44%,延性系数依次下降 2.17%、0.56%、1.68%、0.57%、2.29%、2.34%。

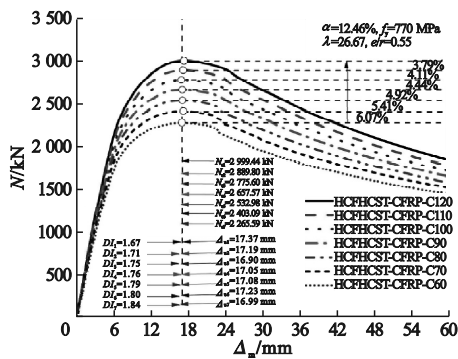


图 11 f_{cu} 对 $N-\Delta_m$ 曲线的影响
Fig. 11 Effect of f_{cu} on $N-\Delta_m$ curve

综上所述,随 f_{cu} 增加,构件的极限承载力和初始刚度提升幅度不大。在受力初始阶段,由于各材料间无相互作用,提升 f_{cu} 对构件初始刚度的影响较小;随 f_{cu} 增加,构件的极限承载力提升,但 f_{cu} 越高其膨胀量越小,钢管对混凝土的约束效果越弱,因此,仅增加偏压构件的混凝土强度对极限承载力影响较小。由图 11 可知,增加混凝土强度对构件在达到极限承载力时的挠度影响不大,且 f_{cu} 越高,其脆性越大,导致构件的延性变差。

4.2 含钢率

改变构件的含钢率主要改变其钢管厚度, α 影响下的 $N-\Delta_m$ 曲线如图 12 所示。当构件钢管厚度从 3 ~ 7 mm 变化,即含钢率 α 从 7.21% ~ 18.12%,构件的极限承载力、初始刚度以及延性系数均呈上升趋势。钢管厚度每增加 1 mm,构件的极限承载力依次提升 10.34%、8.31%、7.31%、8.58%,初始刚度依次提升 10.91%、9.23%、8.91%、6.37%,延性系数依次提升 2.98%、1.16%、2.86%、2.78%。钢管混凝土构件中外钢管主要用于对内部混凝土的约束,因此,随钢管厚度增加,混凝土受到的约束作用增强,混凝土的抗压能力提升,构件的极限承载力提升。除此之外,钢管主要承担构件所受到拉力,随钢管厚度的增加,构件所能承担的拉力提升,纵向变形能力增强,延性系数提高。

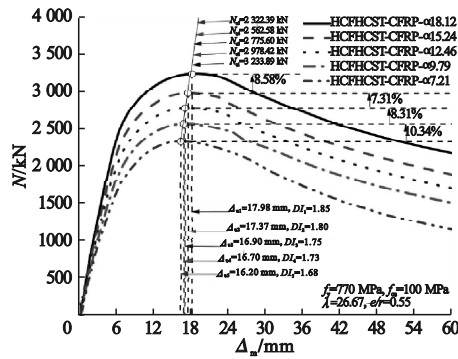


图 12 α 对 $N-\Delta_m$ 曲线的影响
Fig. 12 Effect of α on $N-\Delta_m$ curve

4.3 钢材屈服强度

f_y 影响下的 $N-\Delta_m$ 曲线如图 13 所示。 f_y 从 460 ~ 960 MPa 变化,构件的极限承载力依次提升 7.04%、9.44%、4.52%、5.96%、3.12%,延性系数依次提升 3.09%、3.00%、1.74%、1.71%、2.81%,而初始刚度变化的幅度均保持在 2% 以内,表明增大 f_y 能够提升构件极限承载力和延性系数,但对初始刚度没有影响。随 f_y 增大,钢管承担的荷载增加,对混凝土的约束增强,导致构件极限承载力有所提升,但由于受力初期钢管、混凝土、CFRP 型材三者之间几乎没有相互作用, f_y 的增大对组合柱初始刚度影响不大。同含钢率对构件延性系数影响相同,增大 f_y ,能够使构件所能承担的拉力提升,变形能力增强,延性系数提高。

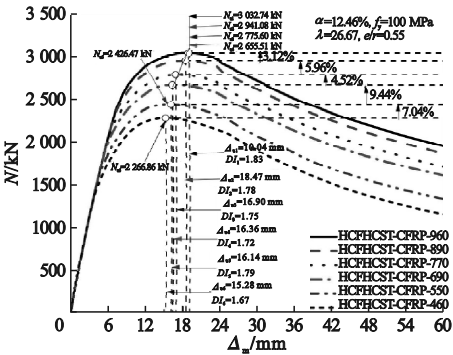


图 13 f_y 对 $N-\Delta_m$ 曲线的影响

Fig. 13 Effect of f_y on $N-\Delta_m$ curve

4.4 偏心率

e/r 影响下的 $N-\Delta_m$ 曲线如图 14 所示。随 e/r 增加,构件的初始刚度和极限承载力均呈下降趋势,延性系数呈上升趋势。偏心距每增加 20 mm,即 e/r 每增加 0.22,构件承载力依次下降 21.06%、21.68%、22.20%、19.59%、13.71%,初始刚度依次下降 61.47%、40.38%、29.90%、23.66%、17.85%,延性系数依次提升 3.07%、4.17%、6.29%、17.20%、7.80%。随 e/r 增加,构件受拉区增大,受压区减小,极限承载力、初始刚度大幅度降低,但曲线下降段变缓,延性增加。

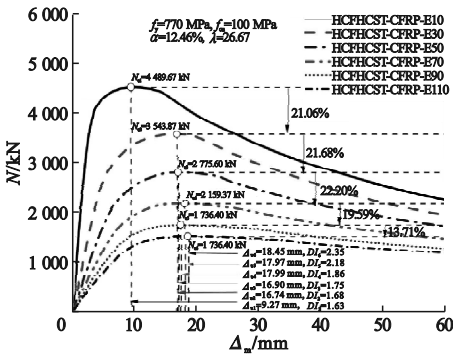


图 14 e/r 对 $N-\Delta_m$ 曲线的影响

Fig. 14 Effect of e/r on $N-\Delta_m$ curve

4.5 长细比

λ 影响下的 $N-\Delta_m$ 曲线如图 15 所示。随 λ 增加,构件的极限承载力及初始刚度均呈下降趋势,延性系数呈上升趋势。 λ 从 26.67 ~ 80.00 每增加 13.33,极限承载力依次下降 20.43%、18.83%、18.29%、18.48%,初始刚度依次下降 56.21%、46.18%、37.58%、34.18%,延性系数依次提升 2.29%、5.03%、2.66%、4.66%。随 λ 增大,二阶效应对构件的影响增强,导致其极限承载力、初始刚度降低,但受力后期构件变形在二阶效应的影响下发展较快,延性变好。

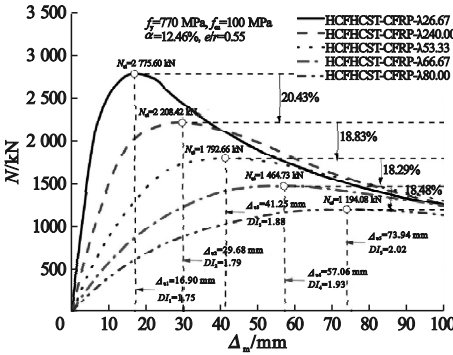


图 15 λ 对 $N-\Delta_m$ 曲线的影响

Fig. 15 Effect of λ on $N-\Delta_m$ curve

4.6 CFRP 配置率

分析 CFRP 配置率对构件力学性能的影响,共设置 4 种 CFRP 配置率如图 16 所示。其中,CFRP 配置率 0% 为普通钢管混凝土;CFRP 配置率为 5.29% 分为两种情况:CFRP 厚度为 8 mm,CFRP 规格为 60 mm × 70 mm × 8 mm,见图 16(c);不改变 CFRP 厚度,仅增

大 CFRP 翼缘和腹板的尺寸,CFRP 规格为 80 mm×84 mm×6 mm,见图 16(d)。

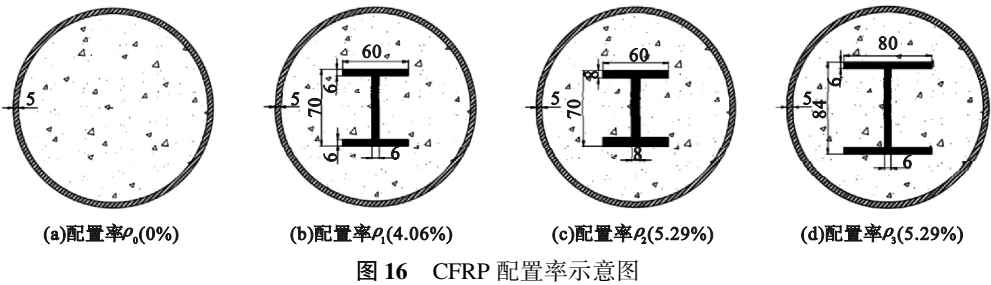


Fig. 16 The schematic diagram of configuration ratio for CFRP

不同 CFRP 配置率的构件 $N-\Delta_m$ 曲线如图 17 所示。CFRP 型材在组合构件中占比较小且前期不与钢管、混凝土发生相互作用,因此,CFRP 型材在初始受力阶段对构件不产生影响,不同 CFRP 配置率的构件初始刚度变化不大。受压侧钢管屈服以后,CFRP 型材开始发挥作用,CFRP 型材与钢管共同对混凝土产生约束使混凝土抗压强度得到提升,且 CFRP 配置率越高对混凝土的约束效果越强,构件的极限承载力提升越明显。CFRP 型材配置率为 4.06%、5.29%、5.29% (CFRP 规格为 80 mm×84 mm×6 mm) 的构件极限承载力比 CFRP 配置率为 0% 的构件分别大 101.34 kN、130.10 kN 和 165.57 kN,提升幅度为 3.79%、4.86%、6.19%。在荷载下降段,由于 CFRP 型材为脆性材料,当其受压侧纤维出现失效时,构件 $N-\Delta_m$ 曲线将与无 CFRP 型材构件趋于一致,其延性略有降低,建议 CFRP 型材配置率满足自身承载能力和变形要求即可。

由图 17 可知,当 CFRP 型材配置率相同时,增加 CFRP 型材翼缘和腹板的尺寸相较于增加 CFRP 型材厚度,构件的承载力提升更明显。CFRP 规格为 80 mm×84 mm×6 mm 的构件比规格为 60 mm×70 mm×8 mm 的构件的极限承载力高 35.47 kN,建议优先选择增加 CFRP 翼缘或腹板尺寸的方式来提高 CFRP 配置率。

由以上 6 个参数分析结果表明, e/r 、 λ 对构件的初始刚度、承载力、延性影响较大,而 $\alpha f_y f_{cu} \rho$ 对三者影响相对较小。

5 结 论

(1) HCFHCST-CFRP 偏压中长柱破坏时发生了较大的侧向挠曲,属于弹塑性失稳破坏,延性较好,试件中截面附近由于混凝土被压碎而出现不同程度的鼓曲现象。

(2) HCFHCST-CFRP 偏压中长柱侧向挠度分布曲线与正弦曲线吻合良好,试件在受力过程中变形较为稳定;偏心率越大,试件中性轴初始位置越靠近受压侧,但受力过程中移动越缓慢,试件变形符合平截面假定。

(3) 典型构件的 $N-\Delta_m$ 曲线可分弹性段、弹塑性段、塑性强化段和下降段 4 个受力阶段;CFRP 型材在弹塑性段后承担荷载比例逐渐增加且能够与钢管协同工作,对混凝土形成双重约束,提高构件的极限承载力。

(4) 组合构件的极限承载力和初始刚度随 e/r 、 λ 的增加而下降,随 α 增加而提升;随 $f_y f_{cu} \rho$ 增加,构件的极限承载力有所提升,但其初始刚度变化不明显; e/r 、 λ 、 α 以及 f_y

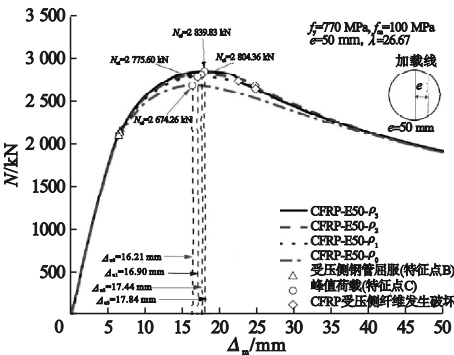


图 17 ρ 对 $N-\Delta_m$ 曲线的影响

Fig. 17 Effect of ρ on $N-\Delta_m$ curve

增加均能够提升构件的延性,但增加 f_{cu} 和 ρ ,构件的延性略有降低。

参考文献

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2003.
(ZHONG Shantong. The concrete-filled steel tubular structures [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press,2003.)
- [2] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 3版. 北京:科学出版社,2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press,2016.)
- [3] FUJIMOTO T, MUKAI A, NISHIYAMA I, et al. Behavior of eccentrically loaded concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of structural engineering, 2004, 130(2): 203–212.
- [4] 李岷昌, 陈博文, 杨志坚, 等. 高强方钢管高强混凝土长柱偏压性能[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(6): 40–53.
(LI Guochang, CHEN Bowen, YANG Zhijian, et al. Eccentric compression behavior of high-strength concrete-filled high-strength square steel tubular long columns [J]. Progress in steel building structures, 2022, 24(6): 40–53.)
- [5] 沈阳建筑大学, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 高强钢管混凝土结构技术规程: T/CECS987—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
(Shenyang Jianzhu University, China Association for Engineering Construction Standardization. Technical specification for concrete filled steel tubular structures with high strength materials: T/CECS987—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.)
- [6] PORTOLES J M, ROMERO M L, BONET J L, et al. Experimental study of high strength concrete-filled circular tubular columns under eccentric loading [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(4): 623–633.
- [7] LEE S H, UY B, KIM S H, et al. Behavior of high-strength circular concrete-filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading [J]. Journal of constructional steel research, 2011, 67(1): 1–13.
- [8] 罗霞, 韦建刚, 韩金鹏, 等. 高强钢管超高强混凝土短柱偏压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(增刊2): 271–277.
(LUO Xia, WEI Jiangang, HAN Jinpeng, et al. Experimental study on compression performance of ultra-high-strength concrete (UHSC) filled high-strength steel tube stub columns subjected to eccentric load [J]. Journal of building structures, 2021, 42(S2): 271–277.)
- [9] ZHANG R, CHEN S M, GU P, et al. Structural behavior of UHPC filled steel tubular columns under eccentric loading [J]. Thin-walled structures, 2020, 156: 106959.
- [10] LI G C, CHEN B W, YANG Z J, et al. Experimental and numerical behaviour of eccentrically loaded high strength concrete filled high strength square steel tube stub columns [J]. Thin-walled structures, 2018, 127: 483–499.
- [11] LI G C, CHEN B W, YANG Z J, et al. Experimental and numerical behavior of eccentrically loaded square concrete-filled steel tubular long columns made of high-strength steel and concrete [J]. Thin-walled structures, 2021, 159: 107289.
- [12] SHEN Q H, WANG J F, WANG J X, et al. Axial compressive performance of circular CFST columns partially wrapped by carbon FRP [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 155: 90–106.
- [13] ZENG J J, GUO Y C, LIAO J J, et al. Behavior of hybrid PET FRP confined concrete-filled high-strength steel tube columns under eccentric compression [J]. Case studies in construction materials, 2022, 16: e00967.
- [14] YANG J L, WANG J Z, ZHANG S, et al. Behavior of eccentrically loaded circular CFRP-steel composite tubed steel-reinforced high-strength concrete columns [J]. Journal of constructional steel research, 2020, 170: 106101.
- [15] 郎隼, 杨志坚. 内置碳纤维复材圆管直径尺度对方钢管混凝土短柱力学性能的影响[J]. 工业建筑, 2017, 47(8): 145–151.
(LANG Yan, YANG Zhijian. Effect of the diameter gauge of CFRP tube on mechanical property of CFSST short column [J]. Industrial construction, 2017, 47(8): 145–151.)
- [16] WANG J F, SHEN Q H, WANG F Q, et al. Experimental and analytical studies on CFRP strengthened circular thin walled CFST stub columns under eccentric compression [J]. Thin-walled structures, 2018, 127: 102–119.
- [17] 周冰. 内置 CFRP 工字形型材的方钢管混凝土轴压短柱力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
(ZHOU Bing. Study on mechanical behavior of concrete-filled square steel short column with inner CFRP I-shaped profiles under axial compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [18] 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 Wei. Research on mechanical of concrete-filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [19] YAN B, ZHOU X H, LIU J P. Behavior of circular tubed steel-reinforced-concrete slender columns under eccentric compression [J]. Journal of constructional steel research, 2019, 155: 342–354.
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)