

矩形中空夹层钢管混凝土梁纯弯力学性能有限元分析

殷隆涛^{1,2}, 黄宏^{1,2*}, 汪榕鹏^{1,2}, 胡斌^{1,2}

(1. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013;

2. 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330013)

摘要: 提出了一种新型的矩形中空夹层钢管混凝土梁构件。将内钢管向构件受拉侧偏心放置,可以有效减少受拉区混凝土截面面积,充分发挥钢材受拉混凝土受压的特性。利用有限元分析软件ABAQUS建立中空夹层钢管混凝土构件在纯弯作用下的有限元模型,将有限元结果与现有试验结果对比以验证有限元分析方法的准确性后,再对新型组合梁构件进行机理分析和参数分析,变化参数为内钢管偏心率、空心率、内外钢管屈服强度和混凝土强度。分析结果表明:在用钢量及截面高度和宽度一致时,内钢管偏心放置中空夹层钢管混凝土梁的极限抗弯承载力是H型钢极限抗弯承载力的1.6~2.1倍,是空钢管极限抗弯承载力的2.3~2.6倍,且其延性更好;截面高度越大的构件其内外钢管所承受的弯矩占整个构件所受弯矩的比例也越大;矩形中空夹层钢管混凝土纯弯构件的弯矩-跨中挠度曲线大致可以分为弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段;内管偏心放置的承载能力和延性比内管同心放置的纯弯构件的性能更好;内外钢管屈服强度和混凝土抗压强度是影响内管偏心放置中空夹层钢管混凝土梁力学性能的主要因素。最后,提出了内管偏心放置钢管混凝土梁抗弯承载力的简化计算方法。

关键词: 矩形中空夹层钢管混凝土梁;空心率;偏心率;纯弯性能;参数分析

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0001-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230928001

Mechanical Performance Finite Element Analysis of Rectangular CFDST Beams Subject to Pure Bending Load

YIN Longtao^{1,2}, HUANG Hong^{1,2*}, WANG Rongpeng^{1,2}, HU Bin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Performance Monitoring Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong

University, Nanchang 330013, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture,

East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

*Corresponding author: 754591193@qq.com

Abstract: A new type of rectangular concrete-filled double-skin steel tubular (CFDST) beam was proposed. The inner tube is eccentrically placed on the tension side of the beam, effectively reducing the cross-sectional area of concrete in the tension zone, fully utilizing the characteristics of steel in tension and concrete compression. Using the finite element analysis software of ABAQUS, a finite element model of the CFDST beam under bending load was established. Based on the finite element analysis method validated by experimental results from others, mechanism analysis and

收稿日期: 2023-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(52368016), 江西省研究生创新基金项目(YC2022-s511), 江西省教育厅科学技术研究重点项目(GJJ210649)

作者简介:

殷隆涛(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: hylt0416@qq.com。

通信作者:

黄宏(1977—), 女, 博士, 教授, 主要从事钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: 754591193@qq.com。

parameter analysis were conducted on the new composite beam, with varying parameters including the eccentricity of the inner tube, the hollowness ratio, the yield strength of the inner and outer tube, and the concrete strength. The analysis results show that, when the steel quantity, section height and width are consistent, the ultimate flexural load-carrying capacity of the CFDST beam with eccentrically placed inner tube is 1.6 to 2.1 times that of H-shaped steel beam and 2.3 to 2.6 times that of hollow steel tube beam, with better ductility. The larger the section height of the component, the greater proportion of the bending moment borne by the inner and outer steel tubes. The moment-deflection curve of the rectangular CFDST pure bending component can be roughly divided into the elastic stage, the elastic-plastic stage, and the strengthening stage. The beam with eccentrically placed inner tube exhibits better load-carrying capacity and ductility compared to the beam with concentrically placed inner tube. The yield strength of the inner and outer steel tubes and the compressive strength of the concrete are the main factors affecting the mechanical performance of the CFDST beam with eccentrically placed inner tube. Finally, a simplified formula for the flexural capacity of CFDST beams with eccentrically placed inner tube is proposed.

Keywords: rectangular concrete-filled double-skin steel tubular beam; eccentricity ratio; hollowness ratio; pure bending performance; parameter analysis

近年来,随着建筑工业化的快速发展,装配式建筑得到了人们的重视,相比于传统的现浇施工方式,预制装配式建筑具有提高质量、缩短工期、节约资源、减少能耗等许多优点^[1-2]。其中中空夹层钢管混凝土梁可以作为预制构件广泛应用于装配式建筑中,如组合框架结构^[3]、大跨度重载梁^[4]及铁路桥梁系统^[5]等。

矩形中空夹层钢管混凝土(concrete-filled double-skin steel tube, CFDST)梁是在内外两层矩形钢管夹层之间浇筑混凝土而形成的整体受弯构件,为让大部分夹层混凝土受压、内钢管受拉,将内钢管朝受拉侧偏心放置。同时,在试件下端内管与外管之间焊接较短的栓钉作为定位垫片^[6],构件跨中截面如图1所示,其中 h_i 与 h_o 为内外钢管高度; b_i 与 b_o 为内外钢管宽度; t_i 与 t_o 为内外钢管厚度。本次试件设计仅考虑梁受正弯矩作用时的状态,因此,后续将改进构件两端的构造以适应实际工程支座附近可能承受负弯矩的情况。

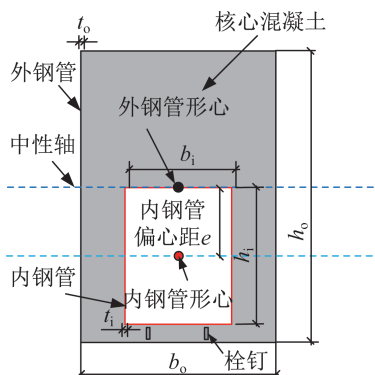


图1 矩形中空夹层钢管混凝土梁跨中截面

Fig. 1 Mid-span section of rectangular CFDST beam

目前,已有学者对中空夹层钢管混凝土构件(内外钢管同心放置)的纯弯性能进行了研究。刘涵等^[7]采用数值模拟的方法,通过改变空心率、锥度、内外钢管强度

以及混凝土强度,研究各参数对圆锥形中空夹层钢管混凝土构件纯弯力学性能的影响。王先铁等^[8]对10个锥形高强中空夹层薄壁钢管混凝土试件进行了纯弯试验,研究了内外钢管径厚比、空心率以及是否设置加劲肋对其力学性能的影响。谢力等^[9]设计了3个矩形套矩形中空夹层钢管混凝土和1个矩形实心钢管混凝土试件,并以空心率为参数进行了纯弯试验。刘清等^[10]对5个圆中空夹层钢管自密实混凝土进行了纯弯试验,研究了空心率对构件纯弯性能的影响。WANG等^[11]以空心率和剪跨比等为影响因素,对12个锥形中空夹层钢管混凝土试件进行纯弯试验。综上所述,已有的研究主要是对同心放置的钢管混凝土受弯构件进行研究。目前已开展纤维复合增强材料(fiber-reinforced polymer, FRP)-混凝土-内管偏心放置组合梁的受弯性能研究,如YU等^[12]对14个FRP-混凝土-钢管组合梁(double-skin tubular beam, DSTB)试件进行了纯弯试验,其中6个试件为内管偏心放置的DSTB,结果表明:相同的FRP层数下,随着FRP层数增加,内管偏心放置的DSTB承载力提高幅度比内管同心放置的DSTB承载力提高幅度更大。ZHAO等^[6]对4个带栓钉的内管偏心放置的DSTB试件进行了纯弯试验,发现栓钉可以有效消除钢管与混凝土的相对滑移。HUANG等^[13]针对钢材屈服强度和偏心率,对6个内管偏心放置的DSTB试件进行了纯弯试验,结果表明:内管偏心放置的DSTB的承载力和延性比内管同心放置的DSTB的承载力和延性更好。但鲜有关于内管偏心放置的钢管混凝土梁的研究报道,因此本文共建立了20个矩形中空夹层钢管混凝土梁模型。同时为了使钢材性能得到充分利用,将内钢管偏心放置于受拉侧,以充分发挥钢材的受拉特性,并减轻构件自重,从而达到轻质高强的目的。

采用ABAQUS软件对已有中空夹层钢管混凝土纯

弯试件进行有限元建模,并将有限元结果与现有试验结果对比以验证有限元分析方法的准确性,再对内管偏心放置的矩形中空夹层钢管混凝土纯弯构件进行有限元模拟及机理分析,比较空钢管、H型钢和新型的矩形中空夹层钢管混凝土梁极限抗弯承载力。同时对其进行参数分析,考察偏心率、空心率(只改变内钢管宽度)、混凝土强度以及内外钢管强度对其极限抗弯承载力的影响。最后,基于极限平衡法提出了内管偏心放置钢管混凝土抗弯承载力简化计算方法。

1 有限元模型的建立

1.1 钢材和混凝土本构关系

内、外钢管均为低碳钢,钢材的应力-应变模型采用五段式弹塑性模型^[14],混凝土受压模型采用韩林海^[14]提出的核心混凝土本构关系模型。而对于混凝土受拉模型,考虑到混凝土主要为剪切受力状态,采用ABAQUS软件提供的应力-断裂能关系来模拟混凝土受拉软化性能,具体断裂能取值参数详见文献^[15]。

1.2 单元选取

内外钢管采用壳单元S4R来模拟,在壳的厚度方向采用9个积分点的Simpson积分。混凝土采用实体单元C3D8R来模拟^[16],由于上下盖板厚度较大,刚度较高,采用离散刚体单元来模拟。

1.3 模型边界条件及加载方式

两端均采用铰接,在距左端盖板100 mm处,约束 y, z 方向的位移;在距右端盖板100 mm处,约束 y 方向的位移,在长度方向采用四分点加载,加载路径为沿 y 轴负方向的线加载。加载采用位移加载方式。边界条件模型及模型网格划分和加载简图如图2、3所示,其中LVDT为位移传感器。

1.4 界面模型

钢管和混凝土的界面模型由法向方向的“硬”接触和切线方向的库伦摩擦模型组成。其中,切线方向的摩擦系数为0.25^[17]。在有限元模型中,采用Tie绑定约束来

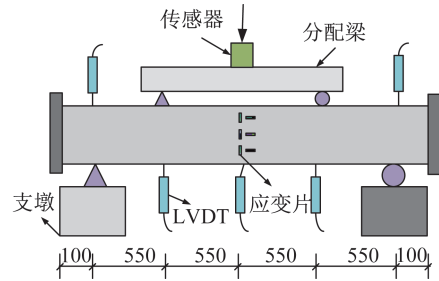


图2 模型网格划分和边界条件示意(单位:mm)
Fig. 2 Schematic diagram of model meshing and boundary conditions (unit:mm)

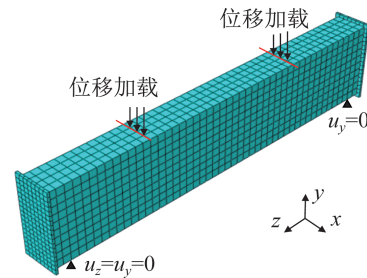
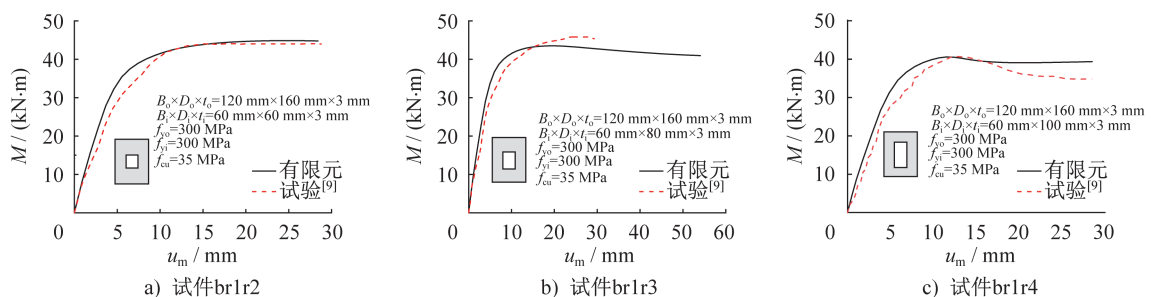


图3 加载简图
Fig. 3 Loading diagram

模拟钢材与盖板的接触。为了更好地模拟实际情况,通过设置材料属性的方式定义盖板为刚性部件。采用法向作用“硬”接触来定义盖板与混凝土的接触。

2 有限元模型的验证

采用上述方法对文献^[9]和文献^[18]中的中空夹层钢管混凝土纯弯构件进行建模分析,并将文献中的试验结果与ABAQUS软件有限元模拟结果进行对比。有限元计算结果与试验结果的弯矩 M -跨中挠度 u_m 曲线对比结果如图4所示,可见两条曲线大致吻合,有限元计算的初始抗弯刚度大于试验结果的初始抗弯刚度,原因可能是有限元模拟的材料偏于理想,而钢管可能存在初始缺陷,但极限抗弯承载力相差较小。且试验得到的极限弯矩值与有限元模拟值的比值的平均值为0.989,标准差为0.028。这说明有限元计算结果与试验结果基本一致,验证了模型的准确性。因此,可利用该模型对新型矩形中空夹层钢管混凝土梁进行下一步机理分析及参数分析。



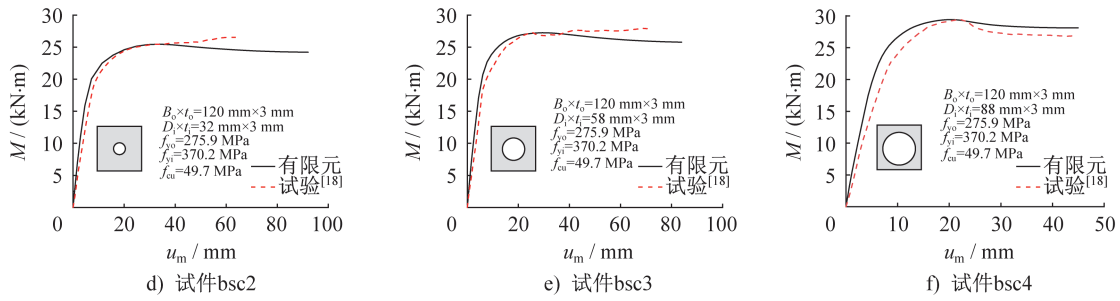


图4 试验结果与有限元分析结果对比

Fig. 4 Comparison between test results and FEA results

3 机理分析

通过典型算例BR-2分析内管偏心放置矩形中空夹层钢管混凝土梁在纯弯作用下的工作机理,选取的典型试件参数为:试件有效长度 $L_0=2\ 200$ mm(两支座之间的距离),外钢管的高度 \times 宽度 \times 厚度为 500 mm \times 200 mm \times 6 mm,内钢管的高度 \times 宽度 \times 厚度为 224 mm \times 144 mm \times 3 mm,构件空心率 $\chi=0.34$,内外钢管屈服强度 $f_{yi}=f_{yo}=235$ MPa,混凝土抗压强度 $f_{cu}=30$ MPa,内管偏心距 $e=112$ mm。在保持用钢量(即H型钢的质量 m)基本相同,截面高度和宽度相同的条件下,比较内管偏心放置的组合截面梁与传统的H型钢梁及空钢管的抗弯承载力。其跨中截面示意如图1、5所示,构件的具体参数如表1~2所示。利用ABAQUS有限元软件输出新型组合梁的内外钢管及核心混凝土的弯矩-挠度关系曲线,同时输出空钢管和H型钢的弯矩-跨中挠度曲线,如图6所示。为便于论述,在图6b)中典型试件的弯矩-挠度曲线上选取3个特征点,分别为:外钢管达到比例极限前的点A;构件达到极限承载力(在试件受力过程中,若试件的弯矩-挠度曲线出现下降段,则极限弯矩 M_u 取弯矩最大值,若曲线没有下降段,则 M_u 取受拉区最外侧纤维应变达到 1×10^{-2} 所对应的弯矩)对应的点B;构件挠度达到 $L_0/30$ 对应的点C。通过各特征点所处的应力状态来分析其受力全过程的工作机理。

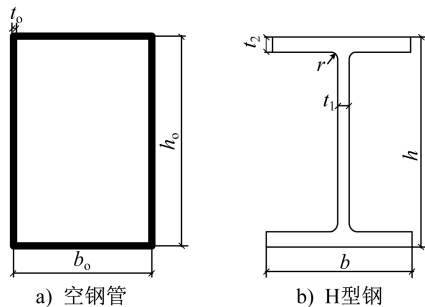


图5 构件跨中截面

Fig. 5 Mid-span section diagram of member

不同截面形式下(截面高度和宽度相同)构件的弯矩-跨中挠度曲线以及钢管混凝土(编号为BR-1、BR-2、

表1 H型钢具体参数^[19]Table 1 Specific parameters of H-section steel^[19]

| 编号 | $h\times b/$ mm | $t_1/$ mm | $t_2/$ mm | $r/$ mm | $m/$ kg | $f_y/$ MPa | $M_u/$ (kN·m) |
|------|--------------------|--------------|--------------|------------|------------|---------------|------------------|
| HW-1 | 400 \times 200 | 8 | 13 | 13 | 157 | 235 | 204.7 |
| HW-2 | 500 \times 200 | 10 | 16 | 13 | 212 | 235 | 309.8 |
| HW-3 | 600 \times 200 | 11 | 17 | 13 | 248 | 235 | 408.0 |

注: h 为H型钢整体高度; b 为翼缘宽度; t_1 为腹板厚度; t_2 为翼缘厚度; r 为翼缘与腹板交界处的圆弧半径; m 为H型钢的质量; f_y 为H型钢的屈服强度; M_u 为有限元计算的H型钢的极限抗弯承载力。

BR-3)中各部件各自承担的弯矩曲线,如图6所示。不同阶段算例各部分所承担弯矩如表3所示。其中具体的极限抗弯承载力如表1~2所示。由图6可知:(1)构件的抗弯承载力随截面高度的增大而显著增大。(2)在用钢量及截面高度和宽度相同的情况下,内管偏心放置中空夹层钢管混凝土梁的极限抗弯承载力是H型钢极限抗弯承载力的1.6~2.1倍,是空钢管极限抗弯承载力的2.3~2.6倍。说明内管偏心放置中空夹层钢管混凝土的极限抗弯承载力要远高于H型钢和空钢管的极限抗弯承载力。(3)H型钢和空钢管在达到极限承载力后,弯矩-挠度曲线急剧下降,而内管偏心放置的钢管混凝土梁在达到极限承载力时,曲线较为平缓,说明在承载后期,内管偏心放置中空夹层钢管混凝土梁的延性要远远优于其余两种构件的延性。(4)由表3可知,对于新型组合截面梁,内外钢管共同承担的弯矩占总抗弯承载力的比例为47%~72%,对于 h_0 大于500 mm的试件,内外钢管承担主要弯矩;且在用钢量相同时,内外钢管二者共同承担的抗弯承载力是H型钢对应值的1.01~1.15倍,是空钢管对应值的1.13~1.88倍。说明核心混凝土对外钢管起到较好的支撑作用,有效地防止了外钢管发生局部屈曲。(5)随着截面高度的增加,内外钢管共同承担的弯矩占对应整体构件所承受弯矩的比例也随之增大。这是因为截面高度增加使得偏心距 e 增大,下部受拉区钢材截面面积增大。

表2 钢管混凝土构件具体参数
Table 2 Specific parameters of concrete-filled steel tubular members

| 编号 | $h_o \times b_o \times t_o / \text{mm}$ | $h_i \times b_i \times t_i / \text{mm}$ | χ | f_{yo} / MPa | f_{yi} / MPa | f_{cu} / MPa | $2e/h_o$ | m / kg | $M_{ul} / (\text{kN} \cdot \text{m})$ |
|-------|---|---|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|-----------------|---------------------------------------|
| ES-1 | 400×200×7 | | | | | | | 155 | 183.1 |
| ES-2 | 500×200×8 | — | 1.00 | 235 | 235 | — | — | 206 | 217.1 |
| ES-3 | 600×200×8 | | | | | | | 236 | 250.2 |
| BR-1 | 400×200×5 | 174×144×3 | | | | | | 146 | 437.7 |
| BR-2 | 500×200×6 | 224×144×3 | — | 235 | 235 | 30 | 0.45 | 196 | 490.1 |
| BR-3 | 600×200×6 | 274×144×4 | | | | | | 225 | 647.7 |
| BR-4 | | | | | | | 0.37 | | 482.3 |
| BR-5 | | | | | | | 0.22 | | 477.1 |
| BR-6 | 500×200×6 | 224×144×3 | 0.34 | 235 | 235 | 30 | 0.11 | 196 | 471.1 |
| BR-7 | | | | | | | 0.00 | | 465.9 |
| BR-8 | | 224×124×3 | 0.29 | | | | | 193 | 493.6 |
| BR-9 | 500×200×6 | 224×104×3 | 0.24 | 235 | 235 | 30 | 0.45 | 191 | 497.0 |
| BR-10 | | 224×84×3 | 0.19 | | | | | 188 | 495.2 |
| BR-11 | | | | | | | | 40 | 514.2 |
| BR-12 | | | | | | | | 50 | 532.8 |
| BR-13 | 500×200×6 | 174×144×3 | 0.34 | 235 | 235 | | 0.45 | 196 | 548.6 |
| BR-14 | | | | | | | | 70 | 563.0 |
| BR-15 | | | | 235 | 345 | | | | 520.9 |
| BR-16 | 500×200×6 | 174×144×3 | 0.34 | 235 | 390 | 30 | 0.45 | 196 | 534.3 |
| BR-17 | | | | 235 | 420 | | | | 542.7 |
| BR-18 | | | | 345 | 235 | | | | 619.7 |
| BR-19 | 500×200×6 | 174×144×3 | 0.34 | 390 | 235 | 30 | 0.45 | 196 | 665.7 |
| BR-20 | | | | 420 | 235 | | | | 694.7 |

注:构件编号中字母ES代表空钢管,B代表纯弯,R代表矩形。 h_i 与 h_o 为内外钢管高度; b_i 与 b_o 为内外钢管宽度; t_i 与 t_o 为内外钢管厚度; χ 为构件的空心率,为截面中空部分面积与混凝土面积加空心面积之比; f_{yi} 与 f_{yo} 为内外钢管屈服强度; f_{cu} 为混凝土强度; e 为偏心距,偏心率为 $2e/h_o$; m 为钢材质量; M_{ul} 为有限元计算的极限抗弯承载力。

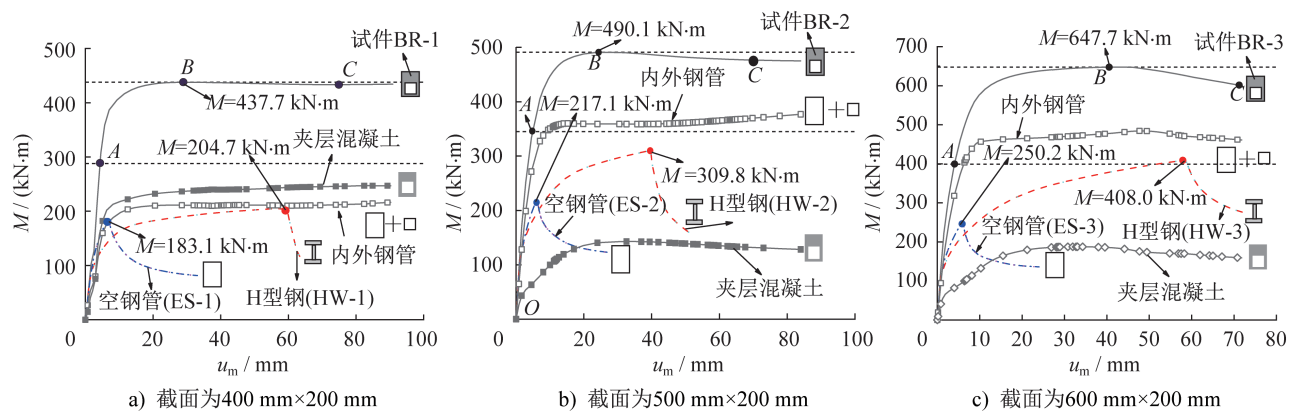


图6 不同截面形式下构件的 $M-u_m$ 曲线及钢管混凝土各部件的 $M-u_m$ 曲线

Fig. 6 $M-u_m$ curves of members with different cross-sectional forms and $M-u_m$ curves of concrete-filled steel tubular components

因此,对于此类构件,可以增大截面高度以充分利用钢材的受拉特性。

表3 不同阶段算例各部分承担弯矩

Table 3 Bending moments carried by all members of example at different stages of calculation kN·m

| 特征点 | 算例 BR-1 | | | 算例 BR-2 | | | 算例 BR-3 | | |
|-----|---------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|-------|-------|
| | 整体构件 | 混凝土 | 内外钢管 | 整体构件 | 混凝土 | 内外钢管 | 整体构件 | 混凝土 | 内外钢管 |
| A | 288.2 | 157.0 | 131.2 | 333.6 | 63.2 | 270.4 | 399.3 | 82.1 | 317.2 |
| B | 437.7 | 231.3 | 206.4 | 490.1 | 136.0 | 354.1 | 647.7 | 177.2 | 470.5 |
| C | 434.2 | 232.8 | 201.4 | 476.2 | 112.1 | 364.1 | 600.7 | 149.5 | 451.2 |

对应图6b)中特征点A、B、C处的混凝土跨中纵向应力和应变分布云图、内外钢管纵向应力分布云图、跨中截面内外钢管 Mises 应力分布曲线,如图7~11所示。其中方向以拉为正,压为负,图7灰色区域代表承受拉应力,而图8灰色区域代表受拉侧。由图可知:(1)弹性阶段(OA段):在OA段试件的弯矩和挠度呈线性,弯矩的增长速度快于挠度的增长速度,中性轴在截面中部区域。在A点时,外钢管跨中受拉区 a_7 、 a_8 位置处 Mises 应力达到比例极限 $f_p=200$ MPa,而内钢管跨中位置处只有 b_7 位置处达到比例极限;受拉区混凝土已开裂,而混凝土跨中受压区纤维纵向应力均小于混凝土圆柱体抗压强度 $f_c=23.7$ MPa,此时试件的变形不明显。(2)弹塑性阶段(AB段):随着荷载的继续增加,弯矩和挠度之间大致呈曲线。中性轴向受压区移动的趋势较为明显,构

件出现明显了弯曲变形。在B点时,外钢管跨中位置处除 a_4 位置外均已屈服,而内钢管跨中位置 b_4 、 b_5 、 b_6 、 b_7 均达到屈服强度;混凝土跨中受压区大部分纤维纵向应力开始大于混凝土圆柱体轴心抗压强度($f_c=23.7$ MPa),其中最外侧纤维压应力达 $1.29f_c$,说明钢管的被动约束作用使得混凝土的抗压强度得到提高;而此时内外钢管受拉区最外侧纤维已进入屈服阶段,且塑性区域继续扩大。(3)强化阶段(BC段):中性轴位置基本保持不变,挠度增长迅速,弯矩略微减小。此时混凝土进入软化阶段。在C点时,外钢管跨中区域除 a_4 位置点外均已屈服,且其余各点 Mises 应力开始大于屈服强度;而内钢管跨中区域除 b_1 点外均已屈服;混凝土跨中纵向应力比B点的纵向应力有所减小,内外钢管纵向应力仍在增加,且塑性区域仍不断发展,但发展速度缓慢。

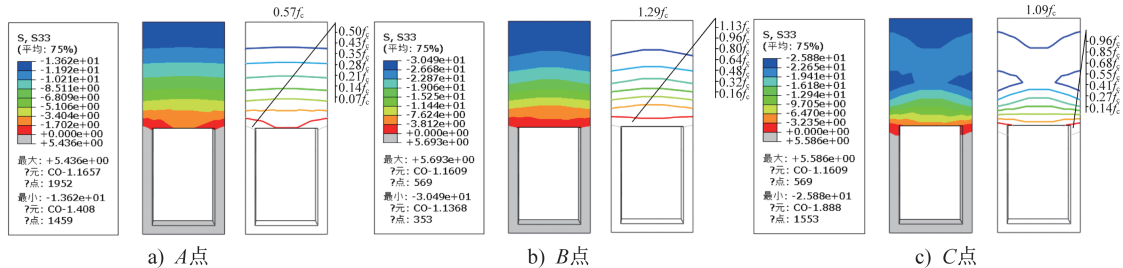


图7 混凝土跨中纵向应力分布云图(单位:MPa)

Fig. 7 Mid-span longitudinal stress distribution contour of concrete (unit: MPa)

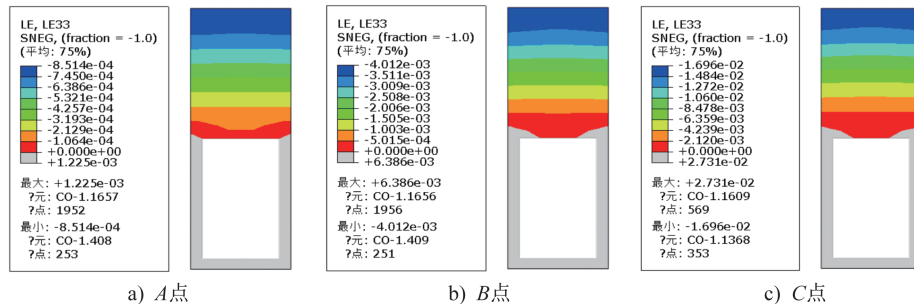


图8 混凝土跨中纵向应变分布云图

Fig. 8 Mid-span longitudinal strain distribution contour of concrete

总的来说,新型组合梁在受弯全过程曲线中,均表现出良好的延性和后期承载能力。

4 参数分析

为进一步研究影响新型矩形中空夹层钢管混凝土梁

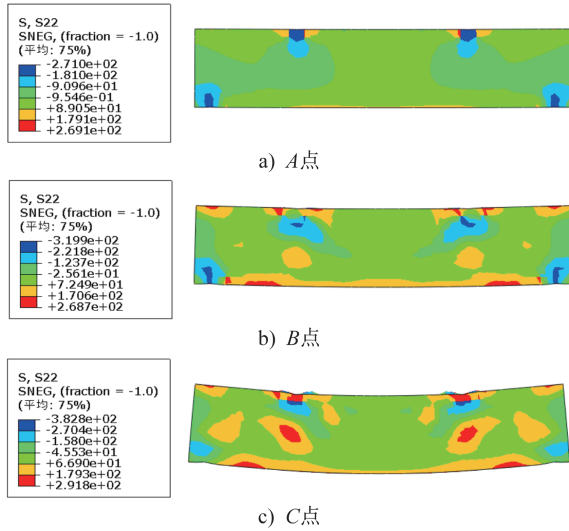


图9 外钢管纵向应力分布云图(单位:MPa)

Fig. 9 Longitudinal stress distribution contour of outer steel tube (unit:MPa)

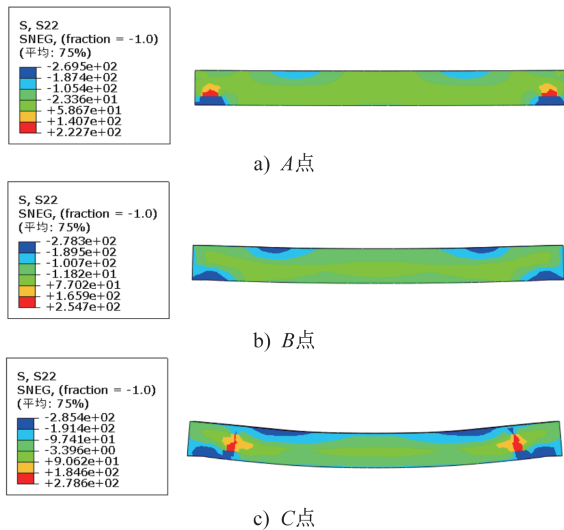


图10 内钢管纵向应力分布云图(单位:MPa)

Fig. 10 Longitudinal stress distribution contour of inner steel tube (unit:MPa)

抗弯性能的因素,分别分析了内钢管偏心率(编号BR4~7)、构件空心率(编号BR8~10)、混凝土强度(编号BR11~14)、内钢管屈服强度(编号BR15~17)和外钢管屈服强度(编号BR18~20)对构件抗弯承载力的影响。

4.1 内钢管偏心率

不同内钢管偏心率下构件的弯矩 M -跨中挠度 u_m 曲线如图12a)所示。由表2可知,构件极限弯矩随偏心率的增大而增大,与 $2e/h_0=0$ 相比, $2e/h_0=0.11、0.22、0.37$ 和 0.45 的构件极限弯矩分别提高了 $1.1%、2.4%、3.5%$ 和 $5.2%$ 。由图可知,在弹性阶段曲线基本重合,说明内钢管偏心率对构件初始刚度的影响不大。而在弹塑性阶

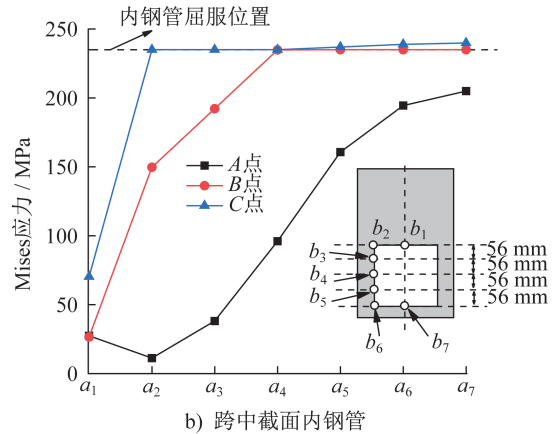
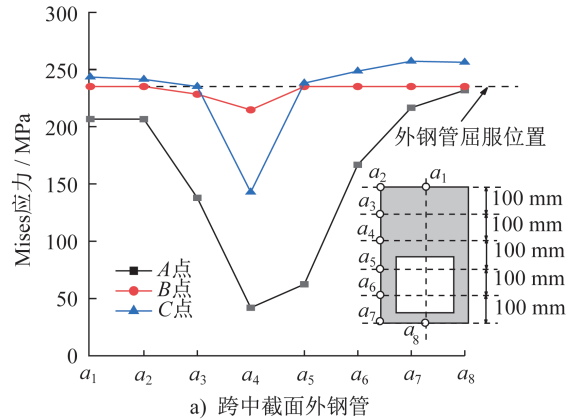


图11 跨中截面内外钢管 Mises 应力分布曲线

Fig. 11 Mises stress distribution curves of inner and outer steel tubes in mid-span section

段,偏心率越大的构件,其抗弯刚度和极限弯矩越大。这是因为内钢管偏心放置,使构件下部受拉区的钢材面积增大,从而使得极限弯矩增大。而到了强化阶段后,偏心率较大的构件曲线更为平缓,说明增大内钢管偏心率可以提高构件的延性和后期承载能力。通过上述研究可知在考虑骨料浇筑密实的情况下,可将偏心率增大至 0.45 以充分发挥内钢管的性能。

4.2 构件空心率

通过改变内钢管宽度 b_1 ,来改变构件的空心率 χ 。不同构件空心率 χ 下构件的弯矩-跨中挠度曲线如图12b)所示。由图可知,当 $\chi < 0.24$ 时, χ 越大,构件的极限弯矩也越大;当 $\chi = 0.24$ 时,构件的极限承载力达到最大值。相较于 $\chi = 0.34$ 时, $\chi = 0.19、\chi = 0.24、\chi = 0.29$ 对应的极限弯矩分别提高了 $0.7%、1.4%$ 和 $1.0%$ 。由图可知,在受力的全过程中,曲线大致相同。说明改变空心率(内钢管宽度)对构件的抗弯刚度和极限抗弯承载力的影响较小。

4.3 混凝土强度

不同混凝土强度 f_{cu} 下构件的 $M-u_m$ 曲线如图12c)所

示。相较于 $f_{cu}=30$ MPa的构件, $f_{cu}=40$ MPa、50 MPa、60 MPa和70 MPa的构件,其极限弯矩分别提升了4.9%、8.7%、11.9%和14.9%。由图可知,在弹性阶段,曲线基本重合,此时混凝土与钢管之间没有相互作用力,所以混凝土强度对构件初始抗弯刚度没有影响。但到了弹塑性和强化阶段,由于混凝土的泊松比大于钢管的泊松比,二者之间出现相互作用力,此时,对于混凝土强度越高的构件,其正常使用抗弯刚度和极限承载力也会越高。

4.4 内钢管屈服强度

不同内钢管屈服强度下构件的弯矩-跨中挠度曲线如图12d)所示。由表2可知,相比于 $f_{yi}=235$ MPa的构件, $f_{yi}=345$ MPa、390 MPa和420 MPa的构件,其极限承载力分别提升了6.3%、9.0%和10.7%,说明增大内钢管强度,能有效提高构件的极限承载力。由图可知,在弹性阶段,

所有曲线基本重合,说明改变内钢管屈服强度对构件的初始抗弯刚度影响不大。但进入弹塑性和强化阶段后,由于内钢管偏心放置于受拉侧,因此增大内钢管的屈服强度会明显增大构件的极限承载能力和正常使用状态抗弯刚度。

4.5 外钢管屈服强度

不同外钢管屈服强度 f_{yo} 下构件的弯矩-跨中挠度曲线如图12e)所示。由表2可知构件的抗弯承载力随外钢管屈服强度的增大而增大,相比于 $f_{yo}=235$ MPa的构件, $f_{yo}=345$ MPa、390 MPa、420 MPa的构件,其极限承载力分别提升了26.4%、35.8%和41.7%,说明改变外钢管强度对构件的抗弯承载力有显著影响。由图可知,在受力全过程中,改变外钢管屈服强度对弹性阶段影响不大;但在弹塑性及强化阶段,构件抗弯承载力和正常使用抗弯刚度随外钢管屈服强度的增大而增大。

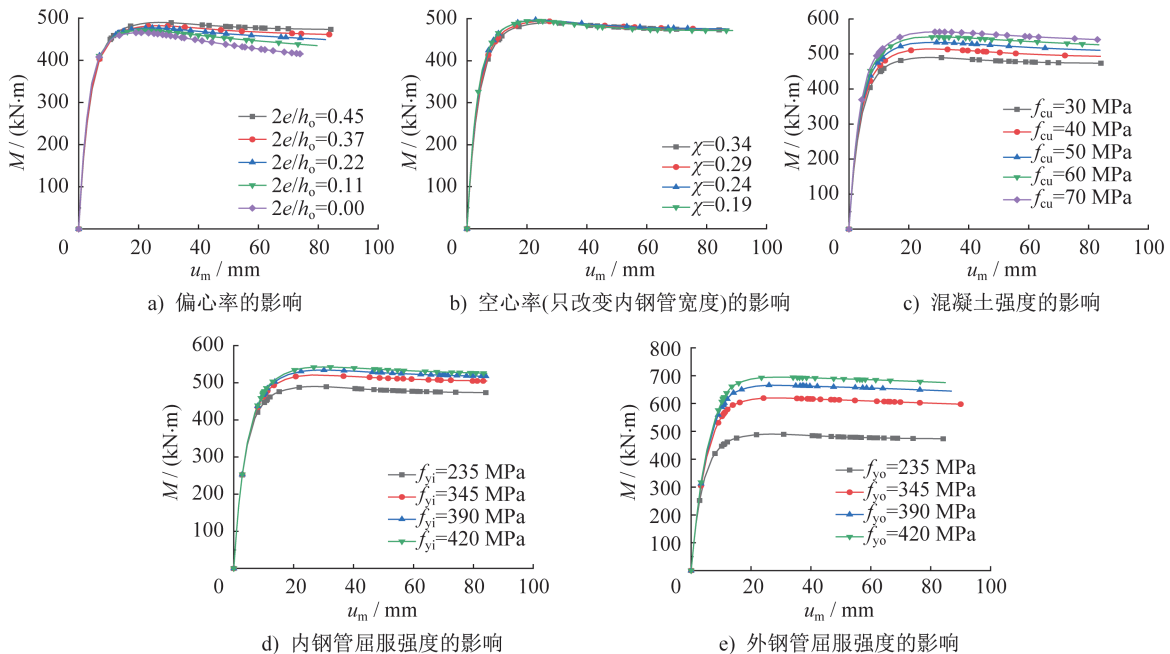


图12 各参数对 $M-u_m$ 关系曲线的影响

Fig. 12 Influences of various parameters on $M-u_m$ relationship curves

5 抗弯承载力计算公式

目前,关于内管偏心放置的钢管混凝土梁抗弯承载力计算方法的研究较少, HUANG等^[13]通过极限平衡法推导出FRP-混凝土-内管偏心放置的钢管组合梁的极限抗弯承载力计算式,其所用外管为FRP管,而本文所用外管为钢管,因此需对计算式进行改进。

在推导内管偏心放置钢管混凝土梁抗弯承载力计算式之前,采用如下基本假定:

(1) 由于混凝土抗拉能力较弱,假定受拉区混凝土不参与工作。

(2) 钢管与混凝土之间无相对滑移。

(3) 极限平衡状态内外钢管全截面屈服,即均达到各自的屈服强度 f_{yo} 、 f_{yi} 。

根据中性轴位置,可将内管偏心放置钢管混凝土梁分为两种类型,对于第一类截面,中性轴位于混凝土中,其中相对受压区高度 $x \leq x_1$,如图13a)所示;对于第二类截面,中性轴穿过内钢管截面,其中 $x > x_1$,如图13b)所示。

对于第一类截面,即 $x \leq x_1$ 时,拉力由内钢管和中性轴下方部分外钢管承担,压力由部分外钢管和混凝土承担,跨中截面需满足平衡状态,力和力矩平衡方程如式(1)~(4)所示。

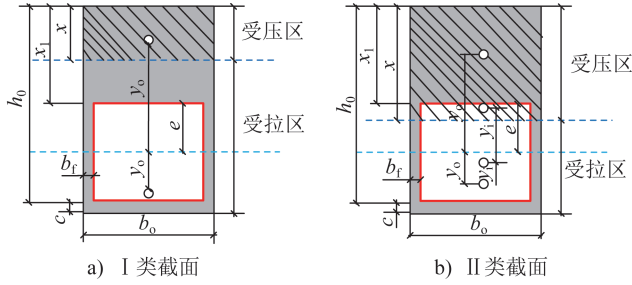


图13 不同截面类型

Fig. 13 Different cross-section types

$$\alpha_1 f_c b_o \beta x + f'_{y_o} A'_{s_o} = f_{y_i} A_{s_i} + f_{y_o} A_{s_o} \quad (1)$$

$$M_{u2} = \alpha_1 f_c b_o \beta x \frac{h_0 + x_1 - \beta x}{2} + f_{y_o} A_{s_o} y_o + f'_{y_o} A'_{s_o} y'_o \quad (2)$$

$$y_o = - \left[\frac{b_o t_o \left(\frac{-h_0 + x_1 - 2c - t_o}{2} \right)}{b_o t_o + 2t_o (h_0 + c - x + t_o)} + \frac{2t_o (h_0 + c - x + t_o) \left(\frac{x_1 - x - c - t_o}{2} \right)}{b_o t_o + 2t_o (h_0 + c - x + t_o)} \right] \quad (3)$$

$$y'_o = \frac{b_o t_o \left(\frac{x_1 + h_0 + t_o}{2} \right) + 2t_o x \left(\frac{x_1 + h_0 - x}{2} \right)}{b_o t_o + 2t_o x} \quad (4)$$

对于第二类截面,即 $x > x_1$ 时,拉力由中性轴下方部分外钢管和内钢管承担,压力由部分外钢管和内钢管以及中性轴上方部分混凝土承担,力和力矩平衡方程如式(5)~(8)所示。

$$f_{y_i} A_{s_i} + f_{y_o} A_{s_o} = \alpha_1 f_c b_o x_1 + 2\alpha_1 f_c b_i (x - x_1) + f'_{y_o} A'_{s_o} + f'_{y_i} A'_{s_i} \quad (5)$$

$$M_{u2} = \alpha_1 f_c b_o x_1 \frac{h_0}{2} + 2\alpha_1 f_c b_i (x - x_1) \left(\frac{h_0 - x}{2} \right) + f'_{y_o} A'_{s_o} y'_o + f'_{y_i} A'_{s_i} y'_i + f_{y_i} A_{s_i} y_i + f_{y_o} A_{s_o} y_o \quad (6)$$

$$y_i = - \frac{b_i t_i \left(\frac{-h_0 + x_1 + t_i}{2} \right) + 2(h_0 - x) t_i \left(\frac{x_1 - x}{2} \right)}{b_i t_i + 2(h_0 - x) t_i} \quad (7)$$

$$y'_i = \frac{b_i t_i \left(\frac{h_0 - x_1 - t_i}{2} \right) + 2(x - x_1) t_i \left(\frac{h_0 - x}{2} \right)}{b_i t_i + 2(x - x_1) t_i} \quad (8)$$

式中: α_1 、 β 分别为混凝土受压区等效矩形应力图系数,当 $f_{cu} \leq 50 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 时, $\alpha_1 = 1.00$, $\beta = 0.80$, 当 $f_{cu} > 80 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 时, $\alpha_1 = 0.94$, $\beta = 0.74$, 其余中间值按线性内插法取用; b_i 为内钢管左侧边缘至外钢管右侧边缘的距离; h_0 为外钢管顶端至内钢管底端的距离; A_{s_o} 和 A'_{s_o} 分别为外钢管受拉区面积和受压区面积; A_{s_i} 和 A'_{s_i} 分别为内钢管受拉区面积和受压区面积; A_{s_i} 为内钢管截面面积; x 为相对受压区高度; x_1 为外钢管上边缘到内管顶端的距离; y_o 和 y'_o 分别为受拉区外

钢管形心点到内钢管形心点的距离和受压区外钢管形心点到内钢管形心点的距离; y_i 和 y'_i 分别为受拉区内钢管形心点到内钢管形心点的距离和受压区内钢管形心点到内钢管形心点的距离。

有限元计算值与简化式预测值的结果对比如表4所示。可知: M_{u2}/M_{u1} 的平均值为 1.010, 标准差为 0.082, 简化式计算的极限弯矩普遍大于有限元计算的极限弯矩, 原因可能是基本假定(3)中认为内外钢管全截面屈服, 但实际情况中可能还存在部分截面未屈服, 因此计算极限弯矩大部分会大于实际值。

表4 有限元计算值与公式计算值对比

Table 4 Comparison between finite element calculated results and equation calculated results

| 编号 | 截面类型 | $M_{u1}/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | $M_{u2}/(\text{kN}\cdot\text{m})$ | M_{u2}/M_{u1} |
|-------|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| BR-1 | I | 437.7 | 302.93 | 0.692 |
| BR-2 | I | 490.1 | 494.99 | 1.010 |
| BR-3 | I | 647.7 | 715.76 | 1.105 |
| BR-4 | I | 482.3 | 481.26 | 0.998 |
| BR-5 | II | 477.1 | 526.24 | 1.103 |
| BR-6 | II | 471.1 | 500.67 | 1.063 |
| BR-7 | II | 465.9 | 475.51 | 1.021 |
| BR-8 | I | 493.6 | 489.95 | 0.993 |
| BR-9 | I | 497.0 | 484.82 | 0.975 |
| BR-10 | I | 495.2 | 479.62 | 0.969 |
| BR-11 | I | 514.2 | 516.21 | 1.004 |
| BR-12 | I | 532.8 | 533.11 | 1.000 |
| BR-13 | I | 548.6 | 546.39 | 0.996 |
| BR-14 | I | 563.0 | 557.08 | 0.989 |
| BR-15 | I | 520.9 | 535.25 | 1.028 |
| BR-16 | I | 534.3 | 550.07 | 1.030 |
| BR-17 | I | 542.7 | 559.42 | 1.031 |
| BR-18 | I | 619.7 | 646.72 | 1.044 |
| BR-19 | I | 665.7 | 708.45 | 1.064 |
| BR-20 | I | 694.7 | 749.52 | 1.079 |

注: M_{u1} 为有限元模拟极限弯矩, M_{u2} 为计算所得极限弯矩。

6 结论

对内钢管偏心放置矩形中空夹层钢管混凝土梁纯弯力学性能进行了机理分析和参数分析, 研究参数包括内钢管偏心率、空心率、内外钢管屈服强度和混凝土强度, 得到以下结论:

(1) 将不同截面形式的中空夹层钢管混凝土纯弯构

件进行有限元建模,并将计算结果与已有试验结果进行对比,有限元计算结果与试验结果基本吻合。

(2) 对于新型矩形中空夹层钢管混凝土梁,在用钢量及截面高度和宽度相同的情况下,内外钢管共同承受的弯矩及延性远高于H型钢和空钢管的弯矩及延性;构件截面高度越大,其内外钢管所承受的弯矩占整个构件所承受弯矩的比例越大。

(3) 新型矩形中空夹层钢管混凝土纯弯构件的弯矩-跨中挠度曲线可以分为三个阶段,即弹性阶段、弹塑性阶段和强化阶段。

(4) 增大内外钢管屈服强度和混凝土抗压强度能显著提高构件的抗弯承载力。而空心率(只改变内钢管宽度)的变化对构件的抗弯承载力几乎没有影响;增大内钢管偏心率虽然对构件承载力的提高不明显,但可以大大增强构件的延性。

(5) 基于极限平衡法提出了内管偏心放置矩形中空夹层钢管混凝土梁的抗弯承载力简化计算式,并通过有限元模型验证了其可靠性。研究结果可为内管偏心放置矩形中空夹层钢管混凝土纯弯构件的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 张艺欣,刘阳,阮杰,等.装配式核心钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(12):135-144.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0552.
ZHANG Yixin, LIU Yang, RUAN Jie, et al. Experimental study on seismic performance of prefabricated core steel tube reinforced concrete columns [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(12):135-144. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0552. (in Chinese)
- [2] 黄宏,胡文斌,帅子坤,等.方钢管再生陶瓷粗骨料混凝土短柱轴压力学性能试验[J].实验力学,2022,37(4):541-550. DOI:10.7520/1001-4888-21-285.
HUANG Hong, HU Wenbin, SHUAI Zikun, et al. Experimental on mechanical behavior of recycled ceramics coarse aggregate concrete filled square steel tubes short columns under axial loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(4):541-550. DOI:10.7520/1001-4888-21-285. (in Chinese)
- [3] 黄宏,朱琪,孙微,等.圆中空夹层钢管混凝土压弯剪构件工作机理研究[J].华东交通大学学报,2015,32(3):91-96,142. DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.03.018.
HUANG Hong, ZHU Qi, SUN Wei, et al. Compression-bending-shear mechanism of concrete-filled double-skin circular steel tubes [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(3):91-96, 142. DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2015.03.018. (in Chinese)
- [4] 王静峰,王翰澜,王涛,等.装配式中空夹层钢管混凝土组合框架混合动力试验研究[J].建筑结构学报,2023,44(4):237-246. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0822.
WANG Jingfeng, WANG Hanlan, WANG Tao, et al. Experimental study on hybrid dynamic test of assembled CFDST composite moment resisting frame [J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(4):237-246. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0822. (in Chinese)
- [5] AL-SHAAR A A M, GÖĞÜŞ M T. Flexural behavior of lightweight concrete and self-compacting concrete-filled steel tube beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 149:153-164. DOI:10.1016/j.jcsr.2018.07.027.
- [6] ZHAO J L, TENG J G, YU T, et al. Behavior of large-scale hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular beams with shear connectors [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(5):04016015. DOI:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000669.
- [7] 刘涵,史艳莉,范家浩,等.圆锥形中空夹层钢管混凝土纯弯构件受力性能研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(5):9-17. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.05.002.
LIU Han, SHI Yanli, FAN Jiahao, et al. Research on the mechanical properties of tapered concrete-filled double skin steel tubular members subjected to pure bending load [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(5):9-17. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.05.002. (in Chinese)
- [8] 王先铁,彭星,张家平,等.锥形高强中空夹层薄壁钢管混凝土构件的抗弯性能试验研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(11):24-33. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.11.003.
WANG Xiantie, PENG Xing, ZHANG Jiaping, et al. An experimental study on the flexural behavior of tapered high-strength thin-walled concrete-filled double skin steel tubular members [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(11):24-33. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.11.003. (in Chinese)
- [9] 谢力,陈梦成,黄宏.矩形中空夹层钢管混凝土纯弯构件的试验研究[J].铁道建筑,2012,52(12):155-158. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2012.12.45.
XIE Li, CHEN Mengcheng, HUANG Hong. Experimental study on concrete filled double skin rectangular steel tubular members under pure bending [J]. Railway Engineering, 2012, 52(12):155-158. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2012.12.45. (in Chinese)
- [10] 刘清,张栋,陈波.圆中空夹层钢管自密实混凝土抗弯承载力试验研究[J].工程力学,2014,31(增刊1):213-216. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.04.S011.
LIU Qing, ZHANG Dong, CHEN Bo. Pure bending of self-compacting concrete-filled double skin steel tubes [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(Suppl.1):213-216. DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.04.S011. (in Chinese)
- [11] WANG W D, FAN J, SHI Y, et al. Research on mechanical behaviour of tapered concrete-filled double skin steel tubular members with large hollow ratio subjected to bending [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 182:106689.

- DOI:10.1016/j.jcsr.2021.106689.
- [12] YU T, WONG Y L, TENG J G, et al. Flexural behavior of hybrid FRP-concrete-steel double-skin tubular members [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2006, 10(5): 443-452. DOI:10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:5(443).
- [13] HUANG Z Y, ZHOU Y W, HU G T, et al. Flexural resistance and deformation behaviour of CFRP-ULCC-steel sandwich composite structures [J]. *Composite Structures*, 2021, 257:113080. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.113080.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构:理论与实际[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2016:67-75.
- HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures: theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016:67-75 (in Chinese)
- [15] 孙浩, 徐庆元, 吕飞, 等. 动力荷载下钢管混凝土墩柱抗震性能极限分析[J]. *铁道学报*, 2023, 45(3): 97-108. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2023.03.012.
- SUN Hao, XU Qingyuan, LYU Fei, et al. Ultimate analysis of seismic performance of concrete-filled steel tube piers under dynamic load [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(3): 97-108. DOI:10.3969/j.issn.1001-8360.2023.03.012. (in Chinese)
- [16] 李永进, 任庆新, 翁兴贵. 火灾作用下钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究[J]. *华东交通大学学报*, 2022, 39(6): 10-17. DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20221104.003.
- LI Yongjin, REN Qingxin, WENG Xinggui. Research on mechanical properties of concrete filled steel tube reinforced concrete column under fire [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2022, 39(6): 10-17. DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20221104.003. (in Chinese)
- [17] 郁晨江, 张扬, 傅光远, 等. 翼缘非等厚矩形钢管混凝土梁受弯性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(9): 120-129. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.09.014.
- YU Chenjiang, ZHANG Yang, FU Guangyuan, et al. Flexural behavior of concrete-filled rectangular steel tube beams with non-identical thickness flanges [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(9): 120-129. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.09.014. (in Chinese)
- [18] 陶忠, 韩林海, 郑永乾, 等. 方中空夹层钢管混凝土纯弯力学性能研究[J]. *工业建筑*, 2004, 34(1): 5-9. DOI:10.3321/j.issn:1000-8993.2004.01.002.
- TAO Zhong, HAN Linhai, ZHENG Yongqian, et al. Flexural behaviors of concrete-filled double-skin (CHS inner and SHS outer) steel tubes [J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(1): 5-9. DOI:10.3321/j.issn:1000-8993.2004.01.002. (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 热轧H型钢和剖分T型钢: GB/T 11263—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Hot Rolled H and Cut T Section Steel: GB/T 11263—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)