

圆中空夹层钢管混凝土叠合柱 偏压力学性能研究

丁纪楠¹,任庆新¹,王庆贺¹,包龙生²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究圆中空夹层钢管混凝土叠合柱在偏心受压作用下的力学性能,为该类构件的设计和工程应用提供参考。方法 采用有限元软件 ABAQUS 建立精细化非线性分析模型,在模型可靠性得到验证的基础上,对构件进行受力全过程分析。研究叠合柱在不同破坏模式下的工作机理,量化组成部件的内力分配和相互作用关系,考察不同参数对 N_u-M_u 曲线的影响。结果 增大偏心率,试件的初始刚度和偏压承载力降低,延性提高;名义含钢率由 7.1% 增至 19.8% 时,偏压承载力提高了 87.5%。结论 圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱在偏心受压作用下界限破坏的标志为外钢管达到受拉屈服时,受压区边缘的混凝土被压碎;增大钢管屈服强度和名义含钢率可提高试件的偏压承载力。

关键词 中空夹层钢管混凝土叠合柱;组合构件;偏心受压;有限元分析;破坏模式

中图分类号 TU398.9 文献标志码 A

Mechanical Performance of Circular Concrete-encased CFDST Columns under Eccentric Compression

DING Ji'nan¹, REN Qingxin¹, WANG Qinghe¹, BAO Longsheng²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: This paper aims to study the mechanical behavior of the circular concrete-encased concrete-filled double-skin steel tube (CFDST) columns under eccentric compression and provides the reference for the design and engineering application. The mechanical behavior of the circular concrete-encased CFDST stub columns under eccentric compression was numerically investigated in this paper. A finite element model (FEM) was developed and verified using the experimental results. The full-ranged process, the working mechanism and the N_u-M_u curve were analyzed. An increasing eccentricity will reduce the initial stiffness and the eccentric compression strength, and improve the ductility. When the nominal steel tube ratio increases from 7.1% to 19.8%, the

收稿日期:2022-06-01

基金项目:国家自然科学基金项目(52078309);沈阳市科技计划项目(21-108-9-13)

作者简介:丁纪楠(1993—),女,博士研究生,主要从事组合结构与混合结构等方面研究。

eccentric compression strength will improve 87.5%. The balance failure mode is defined as the simultaneous occurrence of yielding of outer steel tube on the tension side and crushing of the compressive concrete. Increasing the yield strength and nominal steel content of the steel tube can improve the eccentric compression strength.

Key words: concrete-encased CFST stub column; composite member; eccentric compression; finite element analysis; failure mode

圆中空夹层钢管混凝土叠合柱是一种以中空夹层钢管混凝土为核心,在其外部绑扎钢筋笼并浇筑混凝土而形成的组合构件。该构件具有与钢管混凝土叠合柱类似的力学性能优势,如承载力高、延性好、耐火和耐腐蚀性能优异等^[1-4]。此外,由于将中空夹层钢管混凝土替代钢管混凝土叠合柱内部的实心钢管混凝土,圆中空夹层钢管混凝土叠合柱还具备减少混凝土用量、提高抗震性能等优势,可应用于高层建筑的承重柱中。

在实际工程中,承重柱在外荷载(竖向荷载和水平风荷载)作用下,常处于偏心受压状态。国内外学者对钢管混凝土叠合构件的偏压力学性能开展了众多研究,Y. F. An 等^[5]采用 ABAQUS 软件对钢管混凝土叠合构件进行有限元分析,考察构件在偏心受压作用下的工作机理,并在参数分析的基础上提出偏压承载力的设计方法。H. J. Lee 等^[6]对 6 个钢管混凝土叠合构件进行偏压试验,结果表明,减小箍筋间距可延缓外部混凝土的破坏。J. M. Cai 等^[7]对钢管混凝土叠合构件进行有限元分析,研究表明,增加偏心率可降低钢管与混凝土之间的约束效应。柯晓军等^[8-9]对 16 个钢管混凝土叠合构件进行偏心试验,并基于叠加原理和截面极限平衡理论提出了偏压承载力设计方法。目前,关于中空夹层钢管混凝土构件偏压力学性能的研究比较完备,主要通过试验和有限元的方法研究不同参数对偏压力学性能的影响,建议偏压承载力的设计方法^[10-14]。

从上述研究可知,针对钢管混凝土叠合构件和中空夹层钢管混凝土构件偏压力学性能的研究已经较为充分,但针对中空夹层钢

管混凝土叠合构件的偏压力学性能研究较少。基于此,笔者建立精细化有限元分析模型,在模型可靠性得到验证的基础上,对偏心荷载作用下的圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱进行受力全过程分析,研究试件在不同破坏模态下的工作机理,量化组成部件的内力分配和相互作用关系,考察几何和物理参数对 N_u-M_u 曲线的影响。

1 有限元模型

1.1 模型的建立

采用 ABAQUS 软件建立的有限元模型如图 1 所示。

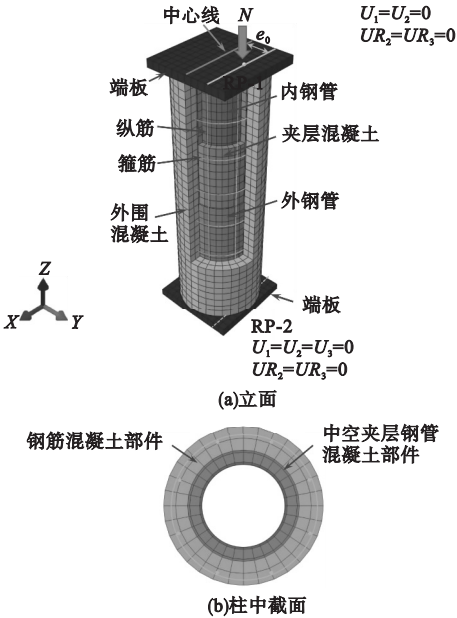


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FEM

模型由上下端板、外部混凝土、箍筋、纵筋、内外钢管以及夹层混凝土组成,其中外部混凝土、夹层混凝土和端板采用 8 节点实体单元;纵筋和箍筋采用 2 节点桁架单元;内、

外钢管采用4节点壳单元,为保证模型的计算精度,在厚度方向采用9个积分节点的Simpson积分。依据文献[15],在上、下端板分别设置参考点RP-1和RP-2,并将参考点与加载线进行耦合,限制RP-1在X方向和Y方向的位移以及绕Y轴和Z轴的转动,在Z轴方向施加向下的位移;限制RP-2除绕X轴转动之外的所有自由度。端板与混凝土采用“绑定”约束,端板与钢管采用“壳-实体耦合”约束,钢筋笼以“嵌入”的方式内置于外部混凝土中,钢管与混凝土之间的界面模型采用法向的“硬”接触和切向的“罚”摩擦,摩擦系数取0.6^[5]。

混凝土采用塑性损伤模型,外部混凝土的单轴受压和单轴受拉应力-应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[16]中的本构关系模型,夹层混凝土的单轴受压和单轴受拉应力-应变关系分别采用侯超^[17]和X. L. Zhao等^[18]建议的本构关系模型。钢管和钢筋采用弹塑性模型,钢管的应力-应变关系采用L. H. Han等^[19]建议的五段式本构模型,钢筋的应力-应变关系采用X. M. Zhao等^[20]建议的双折线本构模型。端板的弹性模量取 10^9 GPa,泊松比取 10^{-5} 。

1.2 模型的验证

将有限元计算结果与文献[21]中试件C-154-20、C-154-40和C-154-60的试验结果进行对比,编号中的字母“C”代表圆形截面试件,“154”代表外钢管直径,“20”、“40”和“60”代表偏心距。试件参数如下:截面直径 $D=220$ mm,试件高度 $H=660$ mm,外钢管直径 $d_o=154$ mm,内钢管直径 $d_i=121$ mm,纵筋配筋率 $\rho_l=4.4\%$,体积配箍率 $\rho_v=4.1\%$,名义含钢率 $\alpha_n=8.2\%$,外部混凝土轴心抗压强度 $f_{c,o}=33$ MPa,夹层混凝土轴心抗压强度 $f_{c,c}=40$ MPa,钢管屈服强度 $f_{y,s}=361$ MPa,纵筋屈服强度 $f_{y,l}=348$ MPa。试件C-154-60有限元计算的破坏模态与试验破坏模态的对比情况如图2所示。

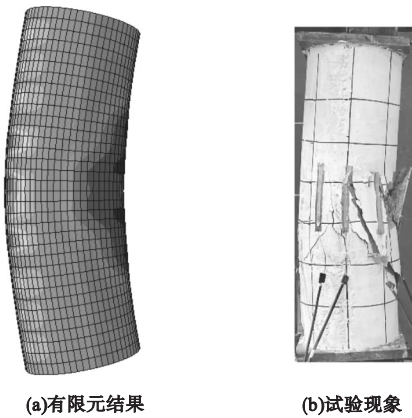
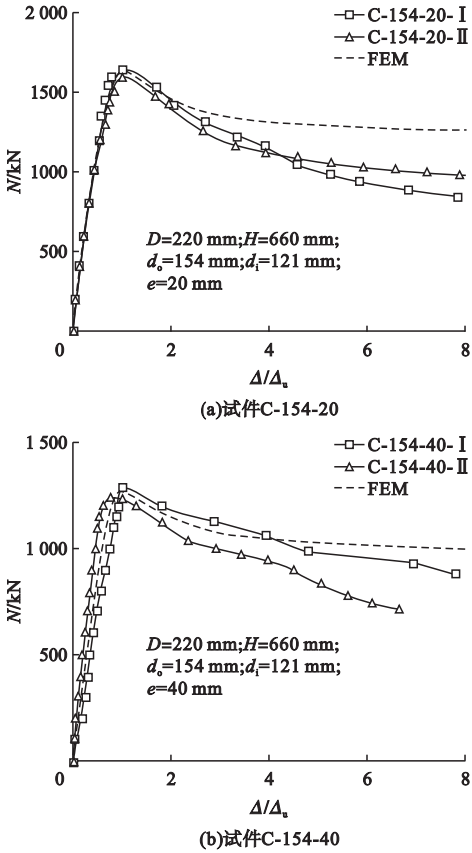


图2 破坏模态对比

Fig. 2 Comparison of failure modes

从图2中可以看出,远离加载端的混凝土表面出现横向裂缝,最大主裂缝位于柱中截面,模拟结果与试验结果一致。图3为有限元计算的偏压荷载-相对位移($N-\Delta/\Delta_u$)曲线与试验曲线对比情况,从图中可以看出,有限元模拟曲线与试验曲线吻合良好,表明笔者建立的有限元模型能够较好地预测圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱的偏压力学性能。



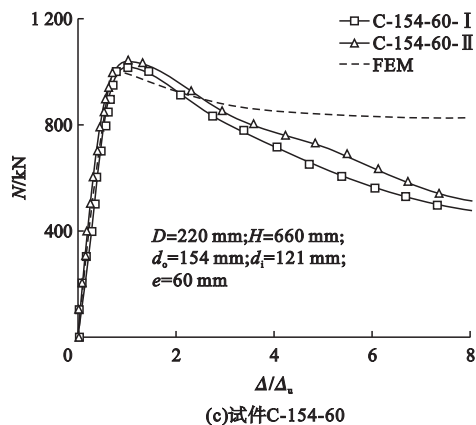


图3 荷载-相对位移曲线对比

Fig. 3 Comparisons of $N-\Delta/\Delta_u$ curves

2 有限元分析

2.1 受力全过程分析

图4为圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱的 N_u-M_u 曲线,其中 N_u 为偏压承载力, M_u 为 N_u 作用下的弯矩。 M_u 取0时对应的 N_u 和 N_u 取0时对应的 M_u 分别为叠合短柱的轴压承载力和抗弯承载力,依据文献[22-23]定义轴压模型和受弯模型的界面接触和边界条件。由图可知,当偏心率 $e/D < 0.8$ 时,增加偏心率,试件的偏压承载力 N_u 逐渐减小,弯矩 M_u 逐渐增大;当偏心率 $e/D = 0.8$ 时,弯矩 M_u 最大;当偏心率 $e/D > 0.8$ 时,偏压承载力 N_u 和弯矩 M_u 随偏心率的增加逐渐降低。将弯矩 M_u 出现拐点处的偏心率定义为临界偏心率 e_b/D ,偏心率小于 e_b/D

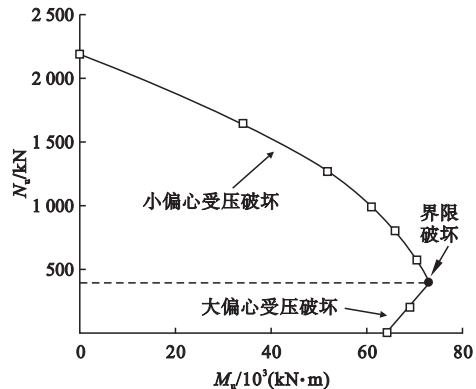


图4 N_u-M_u 曲线

Fig. 4 N_u-M_u curve

时的破坏为小偏心受压破坏,偏心率大于 e_b/D 时的破坏为大偏心受压破坏。

图5为不同破坏模态下试件的偏压荷载-竖向位移曲线。图中关键点的定义如下:当荷载为 L_c 时靠近加载点的纵筋受压屈服;当荷载为 L_t 时远离加载点的纵筋受拉屈服;当荷载为 S_c 时靠近加载点的外钢管受压屈服;当荷载为 S_t 时远离加载点的外钢管受拉屈服;当荷载为 C_c 时靠近加载点的混凝土被压溃,依据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[16],混凝土压应变取 $3\ 300 \times 10^{-6}$;当荷载为 C_t 时远离加载点的混凝土开裂,依据文献[21],混凝土拉应变取 200×10^{-6} 。

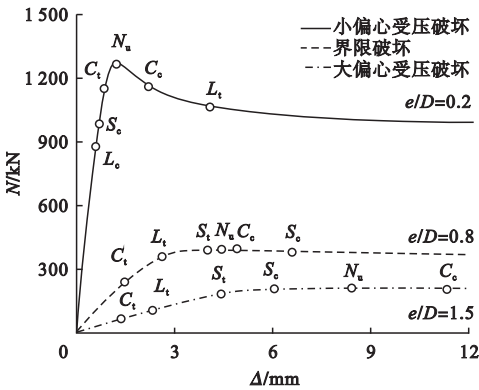


图5 偏压荷载-竖向位移曲线

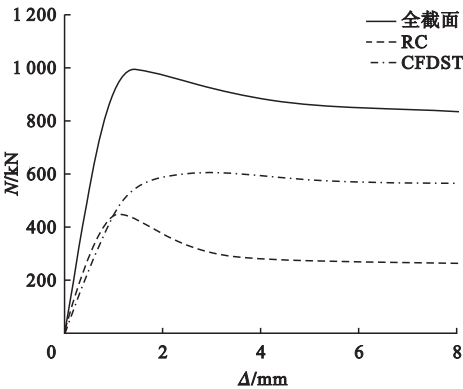
Fig. 5 Eccentric load-displacement curves

由图5可知,对于偏心率 e/D 为0.8时的界限破坏,试件的破坏过程:远离加载点的混凝土开裂→远离加载点的纵筋受拉屈服→远离加载点的外钢管受拉屈服→试件达到偏压承载力→靠近加载点的混凝土被压溃→靠近加载点的外钢管受压屈服。其中,远离加载点的外钢管受拉屈服和靠近加载点的混凝土被压溃几乎同时发生。因此,圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱在偏心受压下的界限破坏可定义为:当远离加载点的外钢管受拉屈服时,靠近加载端的混凝土被压溃。

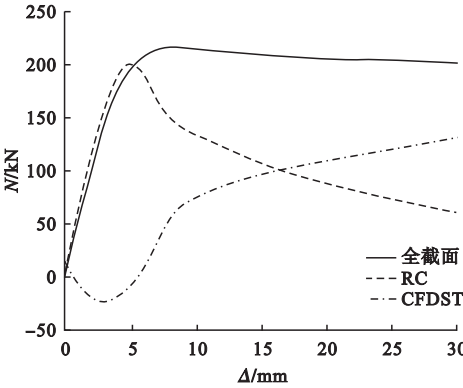
2.2 内力分配

图6为圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱在不同破坏模态下的内力分配情况(RC为

钢筋混凝土部件,CFDST 为中空夹层钢管混凝土部件)。对于小偏心受压破坏试件(见图 6(a)),当试件的全截面处于极限状态时,钢筋混凝土部件已经达到自身极限承载力,中空夹层钢管混凝土部件的承载力处于上升阶段。对于大偏心受压破坏试件(见图 6(b)),在加载初期,钢筋混凝土部件承担压应力,中空夹层钢管混凝土部件承担拉应力,当试件的全截面处于极限状态时,钢筋混凝土部件已经达到自身极限承载力,中空夹层钢管混凝土部件的承载力处于上升阶段。由于中空夹层钢管混凝土部件的贡献,全截面的延性明显好于钢筋混凝土部件。



(a)小偏心受压破坏



(b)大偏心受压破坏

图6 不同破坏模式下的内力分配

Fig. 6 Load distribution of different failure modes

2.3 混凝土纵向应力分布

图 7 为典型试件的柱中截面混凝土在达到极限承载力 N_u 时的纵向应力 (S33) 分布云图。从图中可以看出,对于小偏心受压试

件(见图 7(a)),靠近加载点的混凝土承受压应力,中和轴位于远离加载点的一侧。由于受到钢管的约束作用,靠近加载点的夹层混凝土承受的纵向最大压应力为轴心抗压强度的 1.48 倍;远离加载点的夹层混凝土由于靠近中和轴,承受的纵向压应力较小,仅为轴心抗压强度的 0.44 倍。对于大偏心受压试件(见图 7(b)),中和轴向加载点方向移动,受拉混凝土的面积增大,由于约束作用,夹层混凝土承受的纵向最大压应力为轴心抗压强度的 1.41 倍。

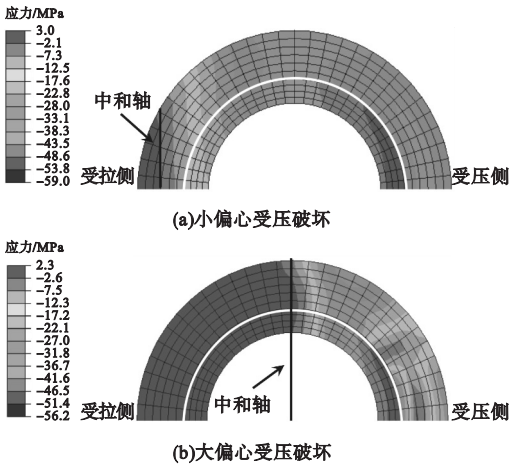


图7 混凝土纵向应力分布云图

Fig. 7 Concrete longitudinal stress distributions

2.4 接触应力分析

典型圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱在不同偏心受压作用下(e/D 取 0.2 和 1.5)的接触应力如图 8 所示。图中 p_1 为钢筋混凝土部件与中空夹层钢管混凝土部件之间的接触应力, p_2 为外钢管与夹层混凝土之间的接触应力, p_3 为内钢管与夹层混凝土之间的接触应力。笔者对远离加载点的A点、位于中

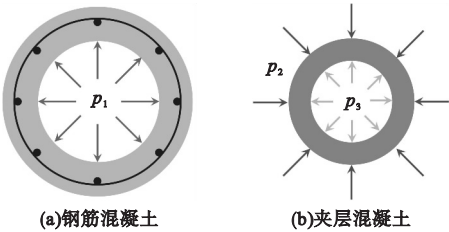


图8 接触应力示意图

Fig. 8 Schematic diagram of contact stresses

心轴的 B 点和靠近加载点的 C 点进行接触应力分析。

图 9、图 10 和图 11 分别为接触应力 p_1 、 p_2 和 p_3 与竖向位移的关系曲线。

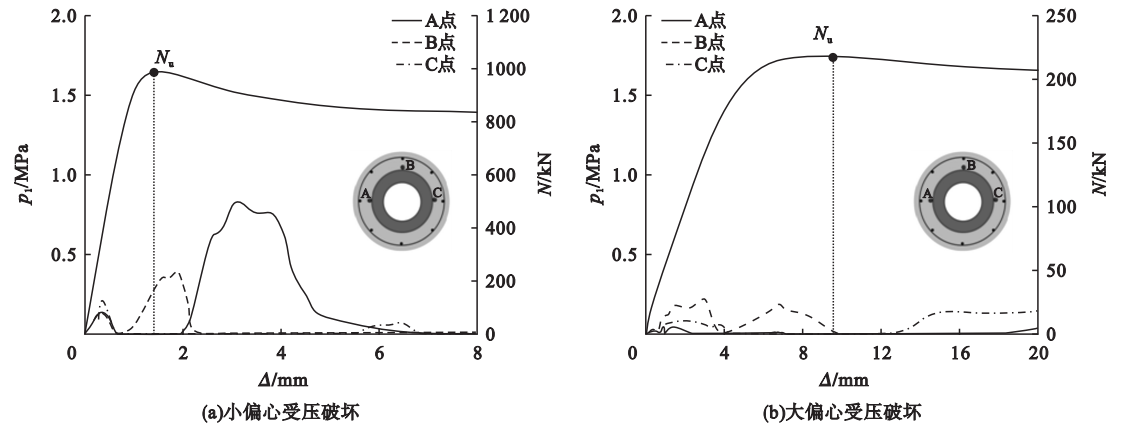


图 9 不同破坏模式下钢筋混凝土部件与中空夹层钢管混凝土部件之间的接触应力 p_1
Fig. 9 Contact stresses p_1 between RC and CFDSST components of different failure modes

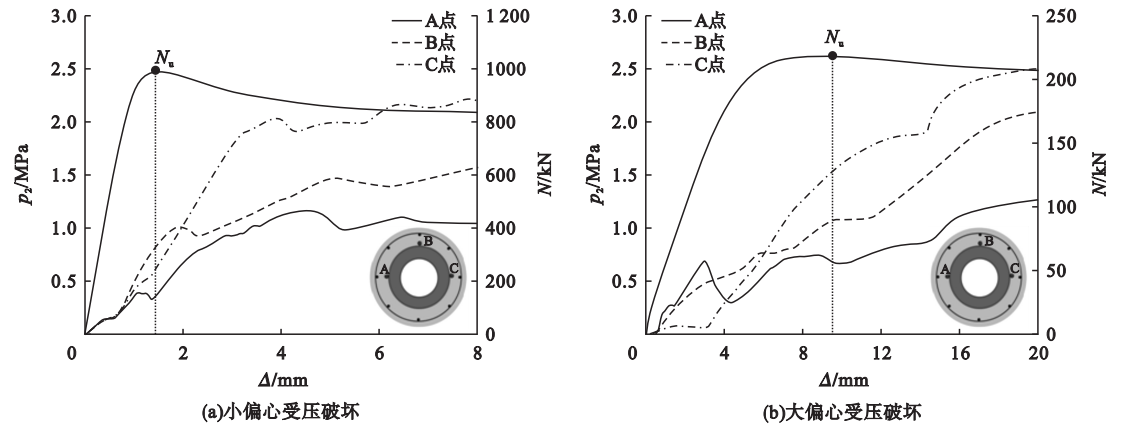


图 10 不同破坏模式下外钢管与夹层混凝土之间的接触应力 p_2

Fig. 10 Contact stress p_2 between outer steel tube and sandwiched concrete of different failure modes

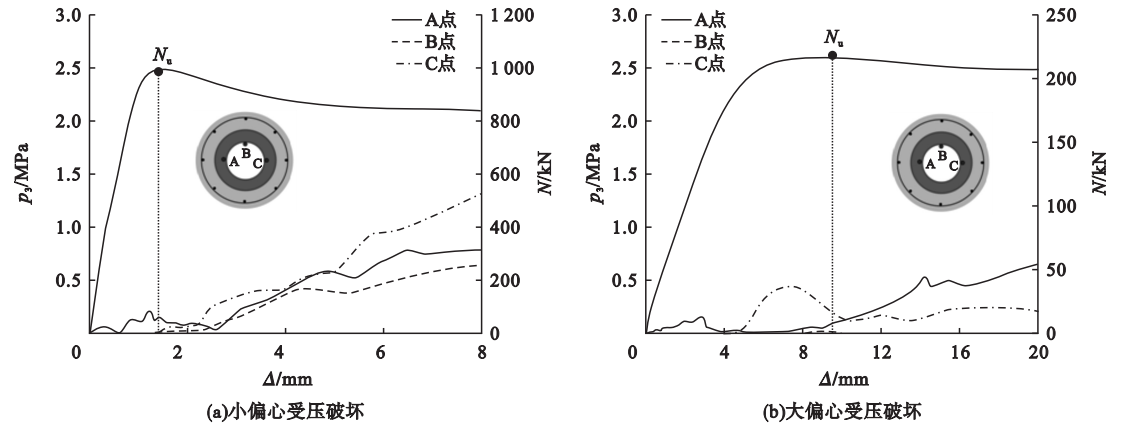


图 11 不同破坏模式下内钢管与夹层混凝土之间的接触应力 p_3

Fig. 11 Contact stresses p_3 between inner steel tube and sandwiched concrete of different failure modes

由图 9 可知,小偏心受压破坏试件的接触应力 p_1 明显大于大偏心受压破坏试件,这

是因为对于大偏心受压破坏试件,外部混凝土受拉开裂而与外钢管脱离。由图 10 可知,

在加载过程中,外钢管始终对夹层混凝土具有约束作用,且随着轴向位移的增大,接触应力 p_2 逐渐增加。由图 11 可知,内钢管与夹层混凝土之间的接触应力 p_3 始终较小,可忽略不计。

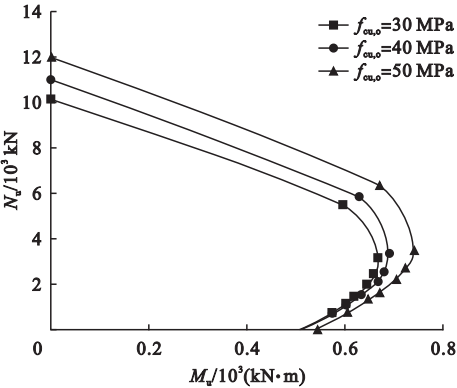
3 参数分析

为分析不同参数对圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱 N_u-M_u 相关曲线的影响,依据《中空夹层钢管混凝土结构技术规程》(T/CCES 7—2020)^[24]和《钢管混凝土混合结构技术标准》(GB/T 51446—2021)^[25]建立足尺有限元模型并进行参数分析。影响圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱 N_u-M_u 相关曲线的参数及范围如下:外部混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu,o}$ 取 30~50 MPa;夹层混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu,c}$ 取 50~70 MPa;钢管的屈服强度 $f_{y,s}$ 取 355~420 MPa;名义含钢率 α_n 取 7.1%~19.8%。

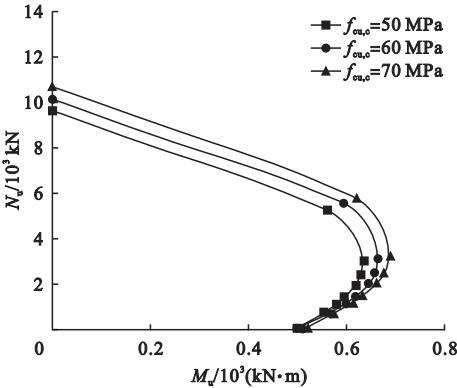
图 12 为不同参数对 N_u-M_u 的影响曲线。由图 12(a)和图 12(b)可知,对于偏心率为 0.2 的小偏心受压破坏试件,当外部混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu,o}$ 由 30 MPa 增加至 40 MPa 和 50 MPa 时,偏压承载力 N_u 提高了 6.1% 和 11.4%;当夹层混凝土的立方体抗压强度 $f_{cu,c}$ 由 50 MPa 增加至 60 MPa 和 70 MPa 时,偏压承载力 N_u 提高了 5.3% 和 10.3%。分析原因,在小偏心荷载作用下,远

离加载点的钢筋和钢管未屈服,试件的破坏主要由受压区混凝土控制,增加混凝土抗压强度能够有效提高试件的偏压承载力。对于大偏心受压破坏试件,提高混凝土抗压强度对偏压承载力的影响较小,这是因为在偏心荷载作用下,受压区混凝土的截面面积较小,混凝土对试件偏压承载力的贡献较弱。

由图 12(c)和图 12(d)可知,对于偏心率为 0.2 的小偏心受压破坏试件,当钢管的屈服强度 $f_{y,s}$ 由 355 MPa 增加至 390 MPa 和 420 MPa 时,偏压承载力 N_u 提高了 3.9% 和 7.3%;当名义含钢率 α_n 由 7.1% 增加至 12.5% 和 19.8% 时,偏压承载力 N_u 提高了 21.7% 和 51.7%。对于偏心率为 1.5 的大偏心受压破坏试件,当钢管的屈服强度 $f_{y,s}$ 由 355 MPa 增加至 390 MPa 和 420 MPa 时,偏压承载力 N_u 提高了 6.3% 和 11.7%;当名义含钢率 α_n 由 7.1% 增加至 12.5% 和 19.8% 时,偏压承载力 N_u 提高了 40.8% 和 87.5%。分析原因,增大 $f_{y,s}$ 和 α_n ,钢管对偏压承载力的贡献增加,此外由中空夹层钢管混凝土的相关研究可知^[26-28],采用名义约束效应系数 ξ ($\xi = \alpha_n f_{y,s}/f_{c,c}$, $f_{c,c}$ 为夹层混凝土轴心抗压强度)来表征外钢管对夹层混凝土的约束作用,提高 $f_{y,s}$ 和 α_n 可增大名义约束效应系数 ξ ,即外钢管对夹层混凝土的约束作用增强,夹层混凝土的抗压强度增强提高,进而提高了试件的偏压承载力。



(a)外部混凝土立方体抗压强度



(b)夹层混凝土立方体抗压强度

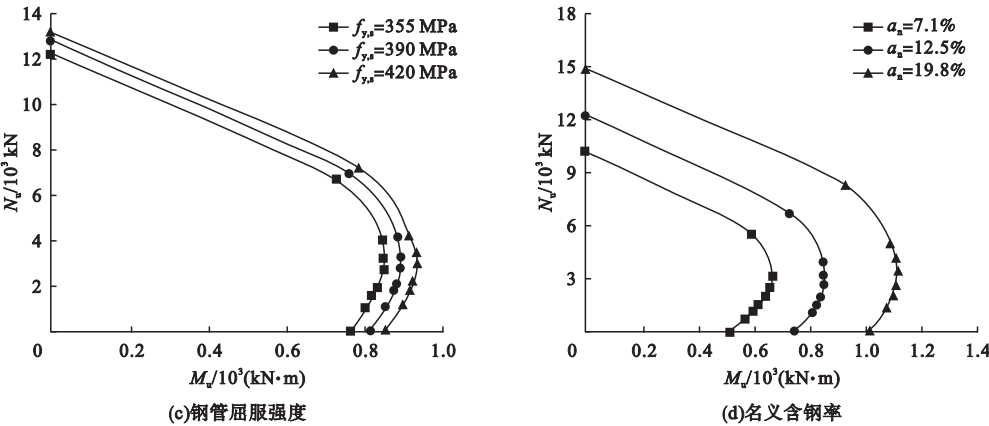


图 12 不同参数对 N_u-M_u 曲线的影响

Fig. 12 Influence of parameters on N_u-M_u curves

4 结 论

(1)圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱在偏压荷载作用下的破坏模态可分为小偏心受压破坏、界限受压破坏和大偏心受压破坏,将外钢管受拉屈服与受压混凝土压溃同时发生定义为界限破坏。

(2)由于中空夹层钢管混凝土部件的贡献,试件的延性好于钢筋混凝土部件。钢筋混凝土部件与中空夹层钢管混凝土部件之间的接触应力较小,可忽略不计;外钢管对夹层混凝土的约束作用明显好于内钢管的约束作用。

(3)增加混凝土抗压强度可提高小偏心荷载作用下圆中空夹层钢管混凝土叠合短柱的偏压承载力,增加钢管屈服强度和名义含钢率可提高偏压承载力。

参考文献

[1] 尧国皇,李永进,廖飞宇. 钢管混凝土叠合柱轴压性能研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5): 114-121.
(YAO Guohuang, LI Yongjin, LIAO Feiyu. Behavior of concrete-filled steel tube reinforced concrete columns subjected to axial compression [J]. Journal of building structures, 2013, 34(5): 114-121.)

[2] CI J C, KONG L X, AHMED M, et al. Experimental and numerical studies of axially loaded square concrete-encased concrete-filled large-diameter steel tubular short columns [J]. Structural concrete, 2022, 23(1): 1-22.

[3] WU Q X, SHE Z M, YUAN H H. Experimental study of UHPC-encased CFST stub columns under axial compression [J]. Structures, 2021, 32(8): 433-447.

[4] LI Y J, HAN L H, XU W, et al. Circular concrete-encased concrete-filled steel tube (CFST) stub columns subjected to axial compression [J]. Magazine of concrete research, 2016, 68(19): 995-1010.

[5] AN Y F, HAN L H. Behavior of concrete-encased CFST columns under combined compression and bending [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 101(10): 314-330.

[6] LEE H J, PARK H G, CHOI I R. Eccentric compression behavior of concrete-encased-and-filled steel tube columns with high-strength circular steel tube [J]. Thin-walled structures, 2019, 144(11): 1-11.

[7] CAI J M, PAN J L, TAN J W, et al. Behavior of ECC-encased CFST columns under eccentric loading [J]. Journal of building engineering, 2020, 30(7): 1-14.

[8] 柯晓军, 苏益声, 商效瑀, 等. 钢管混凝土组合柱压弯性能试验及承载力计算[J]. 工程力学, 2018, 35(12): 134-142.
(KE Xiaojun, SU Yisheng, SHANG Xiaoyu, et al. Strength calculation and eccentric compressive test of steel tube-reinforced concrete composite columns [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(12): 134-142.)

[9] 柯晓军, 杨春辉, 苏益声, 等. 钢管再生混凝土组合柱偏心受压性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 354-365.
(KE Xiaojun, YANG Chunhui, SU Yisheng, et al. Experimental study on eccentric compressive performance of embedded steel tube confined reinforced recycle concrete composite [J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(2): 354-365.)

[10] TAO Z, HAN L H, ZHAO X L. Behavior of concrete-filled double skin (CHS inner and CHS outer) steel tubular stub columns and

- beam-columns [J]. Journal of constructional steel research, 2004, 60(8): 1129 – 1158.
- [11] LIN M L, TASI K C. Behavior of double-skinned composite steel tubular columns subjected to combined axial and flexural loads [C]// Proceedings of the first international conference on steel and composite structures. Korea: Techno Press, 2001.
- [12] HAN L H, TAO Z, HUANG H, et al. Concrete-filled double skin (SHS outer and CHS inner) steel tubular beam-columns [J]. Thin-walled structures, 2004, 42(9): 1329 – 1355.
- [13] TAO Z, HAN L H. Behavior of concrete-filled double skin rectangular steel tubular beam-columns [J]. Journal of constructional steel research, 2006, 62(7): 631 – 646.
- [14] LI W, WANG D, HAN L H. Behavior of grout-filled double skin steel tubes under compression and bending: experiments [J]. Thin-walled structures, 2017, 116(7): 307 – 319.
- [15] REN Q X, DING J N, WANG Q H, et al. Behavior of slender square hollow steel-reinforced concrete columns under eccentric compression [J]. Journal of building engineering, 2021, 43(11): 1 – 17.
- [16] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
(China Academy of Building Research. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.)
- [17] 侯超. 中空夹层钢管混凝土-钢管 K 形连接节点工作机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
(HOU Chao. Performance of concrete-filled double skin steel tube to steel tube K-joints [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.)
- [18] ZHAO X L, TONG L W, WANG X Y. CFDST stub columns subjected to large deformation axial loading [J]. Engineering structures, 2010, 32(3): 692 – 703.
- [19] HAN L H, AN Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93(7): 62 – 76.
- [20] ZHAO X M, WU Y F, LEUNG A Y T. Analysis of plastic hinge regions in reinforced concrete beams under monotonic loading [J]. Engineering structures, 2012, 34(1): 466 – 482.
- [21] 丁纪楠. 中空夹层钢管混凝土叠合短柱轴压和偏压设计方法研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2023.
(DING Ji'nan. Research on design method of concrete-encased CFDST stub columns under axial and eccentric compression [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2023.)
- [22] REN Q X, DING J N, WANG Q H. Performance of square hollow steel-reinforced concrete composite stub columns under axial compression [J]. European journal of environmental and civil engineering, 2022, 26(15): 7825 – 7840.
- [23] REN Q X, DING J N, WANG Q H, et al. Flexural behavior of square hollow steel-reinforced concrete members [J]. Archives of civil and mechanical engineering, 2022, 22(1): 1 – 17.
- [24] 中国土木工程学会. 中空夹层钢管混凝土结构技术规程: T/CCES 7—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
(China Civil Engineering Society. Technical specification for concrete-filled double skin steel tubular structures: T/CCES 7—2020 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.)
- [25] 钢管混凝土混合结构技术标准: GB/T 51446—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
(Technical standard for concrete-filled steel tubular hybrid structures: GB/T 51446—2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.)
- [26] HUANG H, HAN L H, TAO Z, et al. Analytical behavior of concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) stub columns [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(4): 542 – 555.
- [27] 韩林海, 杨有福, 杨华, 等. 基于全寿命周期的钢管混凝土结构分析理论及其应用 [J]. 科学通报, 2020, 65(增刊2): 3173 – 3184.
(HAN Linhai, YANG Youfu, YANG Hua, et al. Life-cycle based analytical theory of concrete-filled steel tubular structures and its applications [J]. Chinese science bulletin, 2020, 65(S2): 3173 – 3184.)
- [28] 韩林海, 牟廷敏, 王法承, 等. 钢管混凝土混合结构设计原理及其在桥梁工程中的应用 [J]. 土木工程学报, 2020, 53(5): 1 – 24.
(HAN Linhai, MU Tingmin, WANG Facheng, et al. Design theory of CFST (concrete-filled steel tubular) mixed structures and its applications in bridge engineering [J]. China civil engineering journal, 2020, 53(5): 1 – 24.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)