

圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱偏压性能分析

王建超¹,王兴雨²,任庆新²

(1. 沈阳建筑大学理学部,辽宁 沈阳 110168;2. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱的偏压性能,提出其偏压承载力计算方法。方法 以长细比、偏心率、混凝土强度、纵筋配筋率及外钢管直径为参数,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立相应的有限元模型,考察不同参数对荷载-挠度曲线和荷载-弯矩曲线的影响,并进行工作机理分析;最后基于叠加理论给出偏压承载力计算方法。结果 圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱在偏压状态下的受力全过程可分为弹性、弹塑性和塑性3个阶段;长细比和偏心率是影响偏压承载力的主要因素,其中长细比由40增加到50和60时,承载力分别降低9.4%和18.9%;偏心率由0.2增加到0.4和0.6时,承载力分别降低31.0%和50.3%;由偏压承载力计算方法所得的结果与有限元模拟结果吻合较好。结论 圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱在减轻自重的情况下具有一定的承载能力和延性,偏压性能良好。

关键词 中空夹层钢管混凝土;钢筋混凝土;中空夹层钢管混凝土叠合柱;长柱;偏心受压

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

引用格式:王建超,王兴雨,任庆新.圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱偏压性能分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(4):647-657.(WANG Jianchao, WANG Xingyu, REN Qingxin. Analysis on eccentric compressive behavior of circular concrete-encased concrete filled double skin steel tube long columns[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(4):647-657.)

Analysis on Eccentric Compressive Behavior of Circular Concrete-encased Concrete Filled Double Skin Steel Tube Long Columns

WANG Jianchao¹, WANG Xingyu², REN Qingxin²

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

Abstract: In order to study the eccentric compression behavior of circular concrete-encased concrete filled double skin steel tube long columns and propose the calculation methods of carrying capacity, the parameters such as the slenderness ratio, eccentricity ratio, concrete strength,

收稿日期:2023-07-03

基金项目:国家自然科学基金项目(52108235)

作者简介:王建超(1981—),男,副教授,博士,主要从事钢管混凝土结构方面研究。

longitudinal rebars ratio and diameter of outer steel tube will be considered in this paper, and the corresponding finite element models are established by ABAQUS. Then investigate the effects of different parameters on load-deflection curves and load-moment curves and analyze the working mechanism of typical model. Finally, the calculation methods of components under eccentric compression are given based on the superposition theory. The whole loading process of circular concrete-encased concrete filled double skin steel tube long columns under eccentric compression can be divided into three stages: elastic, elastoplastic and plastic. The slenderness ratio and eccentricity ratio are the main factors which influence the carrying capacity of components, when the slenderness ratio increases from 40 to 50 and 60, the carrying capacity decreases by 9.4% and 18.9%, respectively; when the eccentricity ratio increases from 0.2 to 0.4 and 0.6, the carrying capacity decreases by 31.0% and 50.3%, respectively. The results obtained from eccentric bearing capacity calculation methods are in good agreement with the finite element simulation results. The study indicates that circular concrete-encased concrete filled double skin steel tube long columns have certain carrying capacity and ductility under the condition of lightening its own weight, and the eccentric compression behavior is good.

Key words: concrete filled double skin steel tube; reinforced concrete; concrete-encased concrete filled double skin steel tube; long column; eccentric compression

中空钢管混凝土叠合柱不仅具有较高的承载能力和延性,还具有一定的耐火性能和耐腐蚀性能。该类构件除了具有上述优点外,还具备自重轻,抗弯刚度大和截面开展等优点,可在高层建筑和桥梁工程中应用。由于不同截面形式的中空钢管混凝土叠合柱其力学性能不尽相同,该类组合结构已成为诸多学者的研究热点^[1-6]。

圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱是由位于核心的中空夹层钢管混凝土及位于外围的环形钢筋混凝土叠合而成,该构件也属于中空钢管混凝土叠合构件。众多学者在此方面进行了大量研究。D. Won 等^[7]对圆中空钢管混凝土叠合柱进行了轴压试验,主要考查了内钢管厚度、中空率及箍筋间距等参数对核心混凝土产生约束作用的影响,结果表明,增加钢管厚度或者中空率均会使核心混凝土所受到的约束效应增强,增大箍筋间距未对核心混凝土产生显著的约束作用。任庆新等^[8]对圆锥形中空钢管混凝土叠合柱进行了轴压试验,考查了截面直径、锥度等参数对轴压承载力的影响,结果表明,随着截面直径的减小,构件承载力呈现出降低的趋势,锥度

的改变对于承载力影响较小。任庆新等^[9]利用 ABAQUS 有限元软件对圆中空钢管混凝土叠合长柱进行了轴压性能研究,分析了长细比、钢管直径及混凝土强度等参数对构件承载力和刚度的影响,并基于现行规范提出了圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压承载力计算方法。

综上所述,目前关于中空钢管混凝土叠合长柱偏压性能的研究相对较少,特别是圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱,其力学性能研究仍有待完善。鉴于此,笔者利用 ABAQUS 有限元软件分析不同参数对圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱偏压性能的影响,并根据相关文献和有限元模拟结果提出圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱的偏压承载力计算方法,以期工程应用提供参考。

1 有限元模型建立及验证

1.1 材料本构模型

低碳软钢采用韩林海^[10]建议的五阶段应力-应变关系曲线,钢筋本构关系选用双折线模型^[11],钢材的弹性模量 E_s 为 206 GPa,泊松比 μ_s 为 0.3。混凝土采用 ABAQUS 有限

元软件中的塑性损伤模型,外混凝土单轴受压本构关系及混凝土弹性模量按照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[12]中的规定选取,夹层混凝土考虑了钢管的约束效应,其受压本构关系采用刘威^[13]提出的公式,泊松比 μ_c 取0.2。

1.2 单元类型、相互作用及边界条件

钢管和混凝土的单元类型均为实体单元(C3D8R),纵筋和箍筋为桁架单元(T3D2)。叠合柱中的钢筋骨架嵌入外围混凝土中。钢管与混凝土之间选择通用接触,法向行为采用硬接触,切向行为采用库伦摩擦模型,摩擦系数 μ 为0.47^[14]。在柱两端面的偏心位置设置参考点,参考点与端面为“点-面耦合”,约束柱顶端参考点除 z 方向水平自由度和 x 方向转动自由度以外的所有自由度,约束柱底端参考点除 x 方向转动自由度以外的所有自由度,以模拟两端铰接的边界条件。在柱顶端参考点施加 z 方向的位移荷载。将初偏心距作为初始几何缺陷,初始偏心距取 $L/1\,000$ ^[15]。

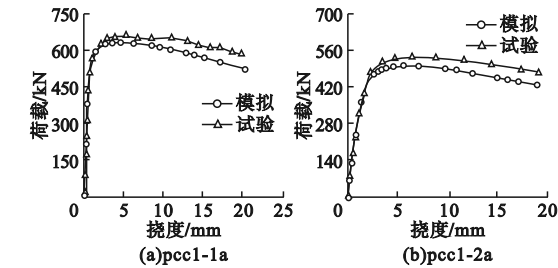


图2 荷载-挠度曲线对比

Fig. 2 Comparisons of the load-deflection curves

2 工作机理分析

文献[17]指出圆形或环形截面满足 $7 < l_0/d \leq 26$ 时, T 形及工字形截面满足 $28 < l_0/i \leq 104$ 时均为长柱,其中 l_0 为构件的计算长度, d 为截面直径, i 为截面回转半径, l_0/i 为长细比,偏心受压长柱在纵向弯曲的影响之下,会发生材料破坏或失稳破坏,材料破坏是指构件受压区边缘混凝土达到极限压应变

1.3 试验验证

为验证有限元模型的可靠性,仅对圆中空夹层钢管混凝土柱偏压试验^[16]进行建模验证,各试件(pcc1-1a、pcc1-2a、pcc1-3a和pcc2-3a)具体参数见参考文献[16]。图1是各试件承载力模拟结果(N_{us})与试验结果(N_{uc})对比, N_{us}/N_{uc} 的平均值和标准差分别为0.967和0.030,说明有限元可以较为准确地预测构件承载力。图2为各试件的模拟曲线与试验曲线对比,加载初期二者刚度一致,曲线吻合良好。

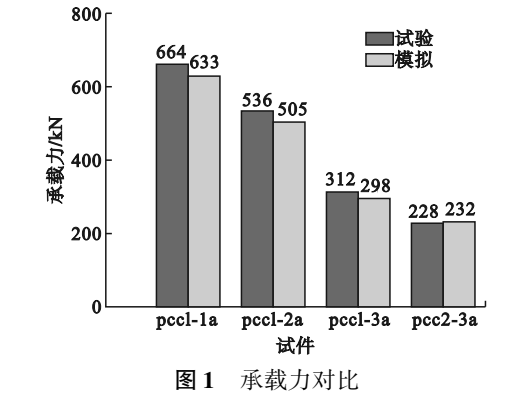
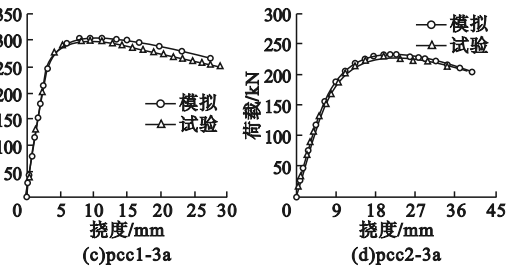


Fig. 1 Comparisons of the carrying capacities



而被压碎,即因截面材料强度耗尽而产生的破坏。当 l_0/i 在22~60时,柱发生材料破坏^[18]。对于 l_0/i 大于104的细长柱,纵向弯曲会使构件突然失去平衡,该类破坏称为失稳破坏。因此,笔者研究长细比小于60的情况。

选取长细比为60的圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱进行偏心受压状态下的工作机理分析,模型SR-60截面参数如下:柱高为

7 680 mm,内钢管直径 $d_i = 108$ mm,外钢管直径 $d_o = 200$ mm,纵筋直径为 16 mm,偏心率为 0.4。所有模型截面直径 D 均为 500 mm,钢管强度等级为 Q235 且壁厚为 6 mm,纵筋数量为 8 根,箍筋直径为 12 mm 且间距为 140 mm,钢筋为 HRB400 级,混凝土保护层厚为 25 mm。有限元模型单元划分示意图如图 3 所示。

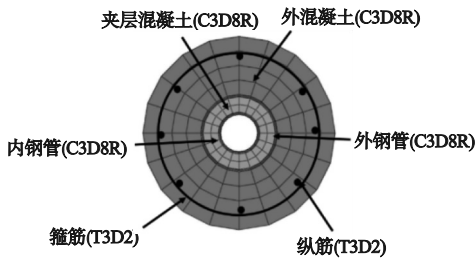


图 3 单元划分示意图

Fig. 3 The diagram of elements partition

2.1 荷载 - 挠度曲线全过程分析

图 4 为模型 SR-60 整个加载过程中的荷载 (N) - 挠度 (u_m) 曲线,各部件云图如图 5 ~ 图 9 所示。其中混凝土部件选取柱中平面,钢管和钢筋骨架选取 1/2 模型。

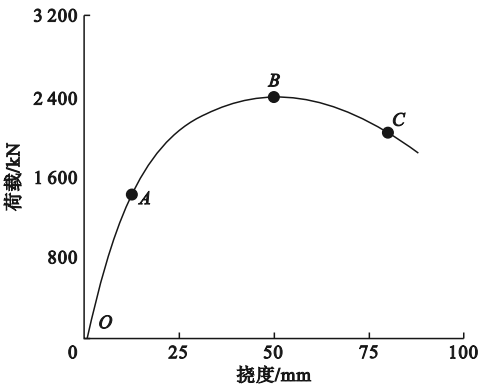


图 4 模型 SR-60 荷载 - 挠度曲线

Fig. 4 The load-deflection curve of model SR-60

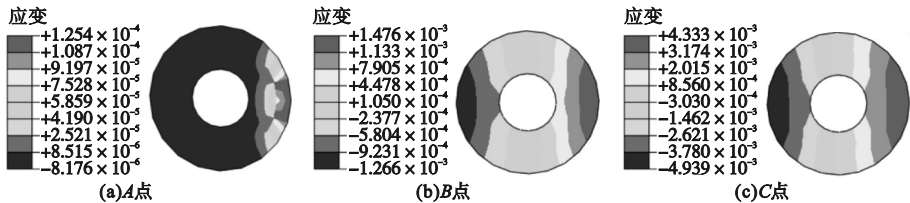


图 5 外围混凝土塑性应变分布

Fig. 5 The plastic strain distribution of outside concrete

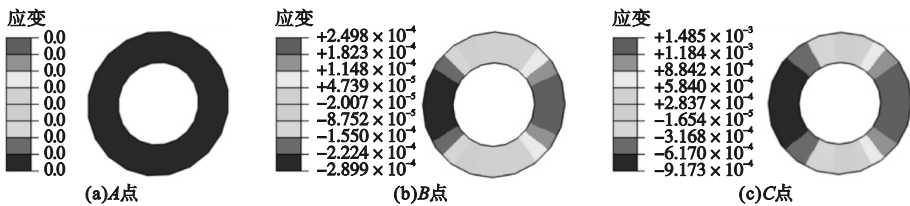


图 6 夹层混凝土塑性应变分布

Fig. 6 The plastic strain distribution of sandwich concrete

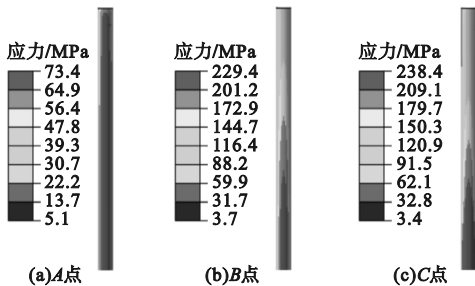


图 7 外钢管应力分布

Fig. 7 The stress distribution of outside steel tube

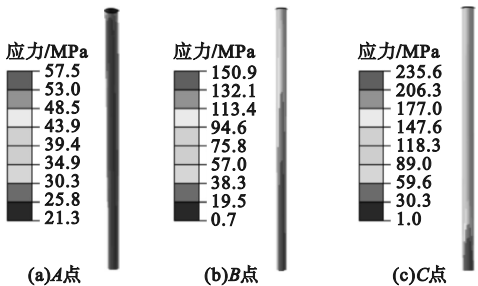


图 8 内钢管应力分布

Fig. 8 The stress distribution of inner steel tube

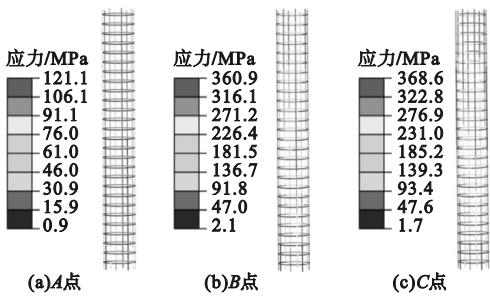


图9 钢筋应力分布

Fig. 9 The stress distribution of rebars

模型 SR-60 受力过程分为三个阶段:

(1)弹性阶段(*OA*):加载初期的混凝土和钢管均处于弹性受力阶段,A 点处的荷载为 1 460.5 kN,约为 $0.6 N_u$,此时柱中挠度为 12.6 mm。外围混凝土的纵向塑性应变 PE33 非常小,可以忽略不计。夹层混凝土未产生塑性应变,构件全截面受压。

(2)弹塑性阶段(*AB*):随着继续施加位移荷载,构件达到极限承载力 2 391.2 kN,弯矩为 380.1 kN·m,柱中挠度为 51 mm,此时截面材料强度已经达到最大值。钢管和混凝土的受拉区范围增大,外围混凝土的纵向塑性应变大幅增长,中和轴向受压区移动,夹层混凝土的塑性应变值较小,纵向钢筋已经屈服。

(3)塑性阶段(*BC*):构件达到极限荷载后继续施加纵向位移,导致材料强度耗尽,不能抵抗因继续施加荷载而造成的变形,因此

在下降段 C 点处的外围混凝土纵向塑性应变值超过了 3.3×10^{-3} ,表明构件已经发生了材料破坏。由于混凝土压碎时,外钢管受拉边缘未屈服,所以构件发生的是小偏心受压破坏。考虑到二阶效应的影响,构件侧向挠度不断增加,弯矩的小幅增长使受拉区范围进一步增大。此时钢管和纵向钢筋的应力已经超过屈服强度,各部件塑性变形均集中在柱中区域。

文献[19]中指出,在偏压状态下的钢管混凝土叠合柱分为大偏心受压破坏和小偏心受压破坏。判断依据为外混凝土压碎时,通过查看分析步外钢管受拉侧应力是否达到屈服强度来确定钢管混凝土叠合柱的破坏类型。若混凝土压碎时,外钢管受拉边缘未屈服,则该类破坏为小偏心受压破坏;若混凝土压碎时,外钢管受拉边缘已经屈服,即外钢管受拉边缘屈服先于混凝土压碎,则该类破坏为大偏心受压破坏。

2.2 相互作用分析

在圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱中,将外混凝土与外钢管、外钢管与夹层混凝土以及夹层混凝土与内钢管这三组接触对分别编号为 1、2 和 3。柱中截面区域受拉侧接触应力 p_t 和受压侧接触应力 p_c 。随挠度变化情况如图 10 所示。

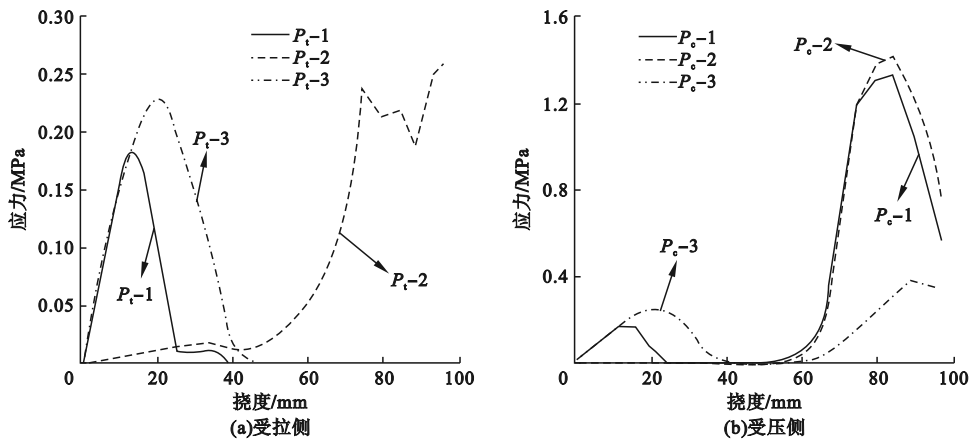


图10 接触应力-挠度曲线

Fig. 10 The contact stress-deflection curves

加载初期截面大部分受压,侧向挠度较小,钢管横向变形量大于混凝土横向变形量,因此, p_t-1 、 p_c-1 、 p_t-3 和 p_c-3 均从0开始线性增加。当弯矩逐渐增大导致受拉侧混凝土开裂时, p_t-1 和 p_t-3 逐渐减小。由于弯矩的作用导致夹层混凝土与外钢管开始受拉并产生接触,故 p_t-2 增大;受压侧钢管和混凝土相互挤压收缩, p_c-1 和 p_c-2 逐渐增大。当继续加载时,外围混凝土被压碎且夹层混凝土内凹变形增大,钢管与混凝土脱开,

p_c-1 和 p_c-2 逐渐减小。在极限荷载时, p_c-1 、 p_c-2 、 p_c-3 和 p_t-1 均为0。

3 参数分析

3.1 模型参数

笔者建立圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱有限元模型,主要分析长细比、偏心率、混凝土强度、纵筋配筋率和外钢管直径对构件荷载-挠度曲线及荷载-弯矩曲线的影响,其中偏心率取0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8和1.0。模型参数如表1所示。

表1 模型参数

Table 1 Parameters of the models

模型	l/mm	混凝土型号	纵筋直径/ mm	偏心率	d_0	$\rho_s/\%$	N_{us}/kN	N_{uc}/kN	$M_{us}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{uc}/(\text{kN}\cdot\text{m})$
SR-40	5 120	C40	16	0.4	200	0.98	2 949.24	2 701.14	379.64	355.25
SR-50	6 400	C40	16	0.4	200	0.98	2 671.40	2 486.73	376.60	376.85
SR-60	7 680	C40	16	0.4	200	0.98	2 391.24	2 259.13	380.13	409.16
ER-02	3 840	C40	16	0.2	200	0.98	4 662.78	4 199.10	303.26	262.16
ER-04	3 840	C40	16	0.4	200	0.98	3 218.18	2 918.60	380.28	343.35
ER-06	3 840	C40	16	0.6	200	0.98	2 318.60	2 054.19	398.88	357.97
CS-30	3 840	C30	16	0.4	200	0.98	2 723.20	2 388.36	310.44	278.29
CS-40	3 840	C40	16	0.4	200	0.98	3 218.18	2 918.60	380.28	343.35
CS-50	3 840	C50	16	0.4	200	0.98	3 711.09	3 507.29	436.44	414.53
LB-12	3 840	C40	12	0.4	200	0.55	2 989.57	2 794.79	354.65	330.82
LB-16	3 840	C40	16	0.4	200	0.98	3 218.18	2 918.60	380.28	343.35
LB-20	3 840	C40	20	0.4	200	1.52	3 437.01	3 077.79	406.64	359.56
STO-200	3 840	C40	16	0.4	200	0.98	3 218.18	2 918.60	380.28	343.35
STO-260	3 840	C40	16	0.4	260	1.12	3 442.67	3 177.39	395.01	365.03
STO-380	3 840	C40	16	0.4	380	1.93	3 936.87	3 849.71	447.43	420.39

注:SR-40表示长细比为40;ER-02表示偏心率为0.2;CS-30表示混凝土强度等级为C30;LB-12表示纵向钢筋直径为12 mm;STO-200表示外钢管直径为200 mm; l 为构件长度; r 为截面半径; e_0/r 为偏心率; d_0 为外钢管直径; ρ_s 为纵筋配筋率; N_{us} 和 N_{uc} 分别为极限承载力的模拟值和计算值; M_{us} 和 M_{uc} 分别为极限承载力时所对应的弯矩模拟值和计算值。

3.2 长细比

长细比对模型荷载-挠度曲线和荷载-弯矩曲线的影响如图11和图12所示。当长细比由40增加到50、60时,构件极限承载力分别降低9.4%和18.9%,刚度分别降低20.9%和35.5%。模型SR-40、SR-50和SR-60在荷载峰值时,柱中挠度分别为24 mm、37 mm和51 mm。可见,长细比的增加使P-δ二阶效应明显。长细比越大,荷载-弯矩曲线中小偏心部分的直线段越长。当长细比由40增加至60时,小偏心受压柱(偏心率为0.1)的极限承载力降低12.2%,大偏心受压柱(偏心率为1.0)的极限承载力降低13.8%。

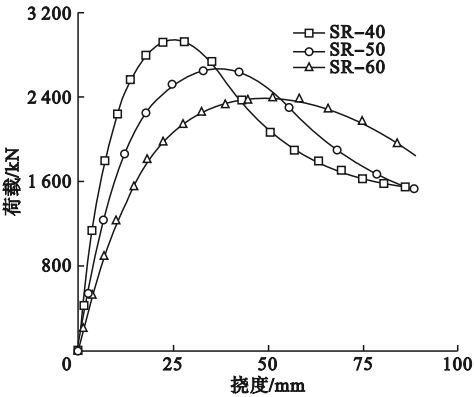


图11 长细比对荷载-挠度曲线的影响

Fig. 11 Effects of slenderness ratio on the load-deflection curves

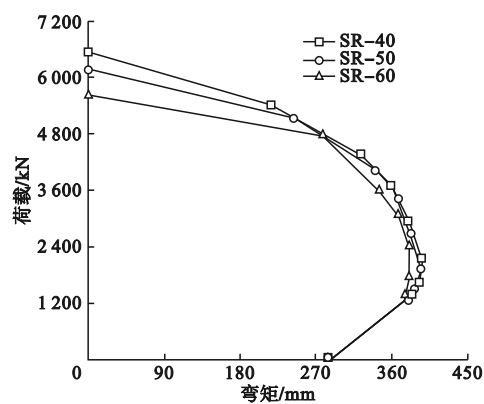


图 12 长细比对荷载 - 弯矩曲线的影响

Fig. 12 Effects of slenderness ratio on the load-moment curves

3.3 偏心率

偏心率对荷载 - 挠度曲线的影响如图 13 所示。

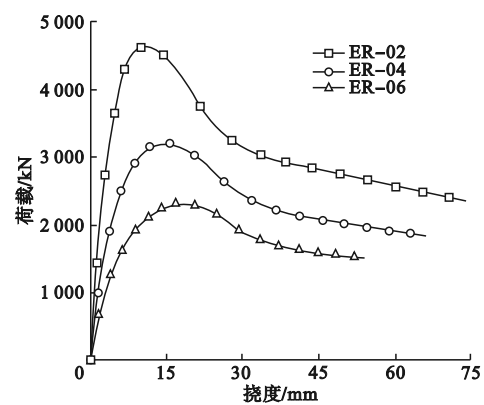


图 13 偏心率对荷载 - 挠度曲线的影响

Fig. 13 Effects of eccentricity ratio on the load-deflection curves

由图 13 可知,偏心率越大,构件的极限承载力和刚度越低,并且在荷载峰值附近的曲线曲率越小,构件具有较高的延性。当偏心率由 0.2 增加到 0.4 和 0.6 时,构件极限承载力分别降低 31.0% 和 50.3%,刚度分别降低 30.6% 和 54.6%。模型 ER-02、ER-04 和 ER-06 在荷载峰值时的柱中挠度分别为 11 mm、14 mm 和 18 mm。

3.4 混凝土强度

混凝土强度对模型荷载 - 挠度曲线和荷载 - 弯矩曲线的影响如图 14 和图 15 所示。

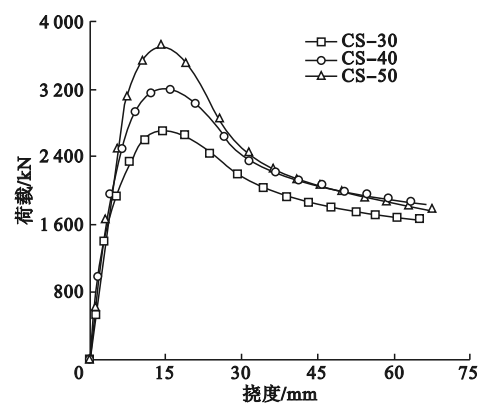


图 14 混凝土强度对荷载 - 挠度曲线的影响

Fig. 14 Effects of concrete strength on the load-deflection curves

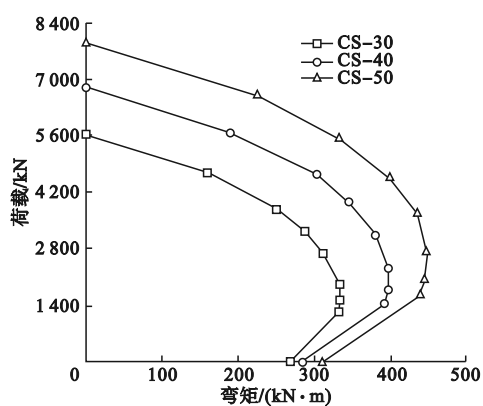


图 15 混凝土强度对荷载 - 弯矩曲线的影响

Fig. 15 Effects of concrete strength on the load-moment curves

当混凝土强度由 C30 提高到 C40、C50 时,构件极限承载力分别提高 18.2% 和 36.3%,峰值荷载时的柱中挠度在 13 ~ 15 mm,提高混凝土强度会使荷载 - 弯矩曲线向外侧移动。当混凝土强度从 C30 提高到 C50 时,对于小偏心受压柱($e_0/r = 0.1$),极限承载力增长 40.2%;对于大偏心受压柱($e_0/r = 1.0$),极限承载力增长 29.4%。可见,随着混凝土强度的提高,小偏心受压柱的极限承载力提高幅度要大于大偏心受压柱。

3.5 纵筋配筋率

纵筋配筋率对模型荷载 - 挠度曲线和荷载 - 弯矩曲线的影响如图 16 和图 17 所示。当配筋率由 0.55% 增加到 0.98% 和 1.52% 时,构件极限承载力分别提高 7.6% 和

15.0%,峰值荷载时的柱中挠度在14~15 mm。增加配筋率会使荷载-弯矩曲线向外移动。当配筋率由0.55%增加到1.52%时,小偏心受压柱(偏心率为0.1)的极限承载力增加9.4%;大偏心受压柱(偏心率为1.0)的极限承载力增加25.0%。可见增加纵筋配筋率后,大偏心受压构件的抗压和抗弯能力大幅提高。

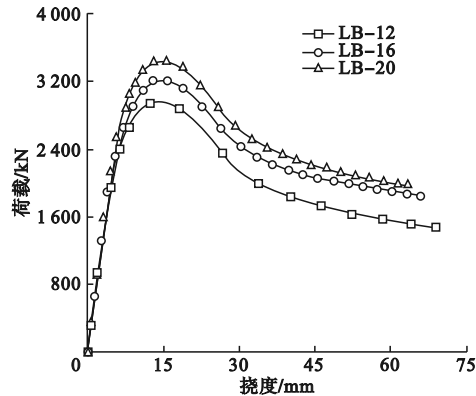


图 16 纵筋配筋率对荷载-挠度曲线的影响
Fig. 16 Effects of longitudinal rebars ratio on the load-deflection curves

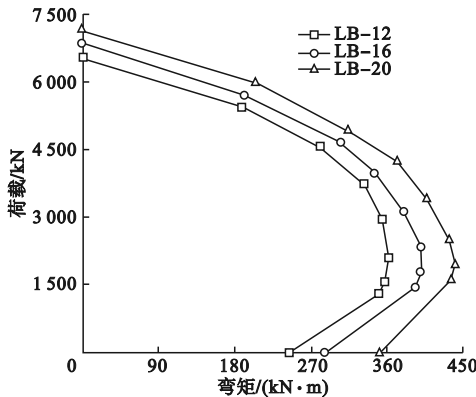


图 17 纵筋配筋率对荷载-弯矩曲线的影响
Fig. 17 Effects of longitudinal rebars ratio on the load-moment curves

3.6 外钢管直径

外钢管直径对模型荷载-挠度曲线和荷载-弯矩曲线的影响如图 18 和图 19 所示。当外钢管直径由 200 mm 增加到 260 mm 和 380 mm 时,构件极限承载力分别提高 6.9% 和 22.3%,峰值荷载时的柱中挠度在 14~15 mm。由模型 STO-380 的荷载-挠度曲线

可以得出,当柱子达到极限承载力后,曲线下降段较为平缓,构件的延性大幅度提升。另外,增加外钢管直径会使荷载-弯矩曲线向外移动。当外钢管直径由 200 mm 增加到 380 mm 时,小偏心受压柱(偏心率为 0.1)的极限承载力增加 12.9%;大偏心受压柱(偏心率为 1.0)的极限承载力增加 37.0%。可见增大外钢管直径后,大偏心受压构件的抗压和抗弯能力大幅提高。

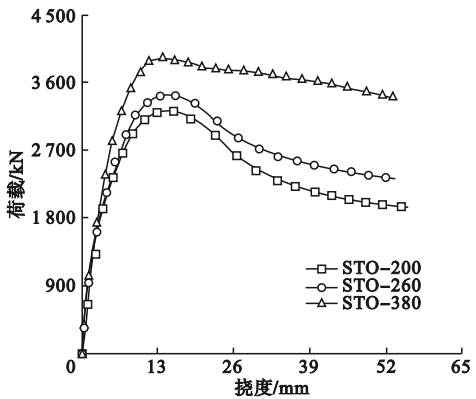


图 18 外钢管直径对荷载-挠度曲线的影响
Fig. 18 Effects of outer steel tube diameter on the load-deflection curves

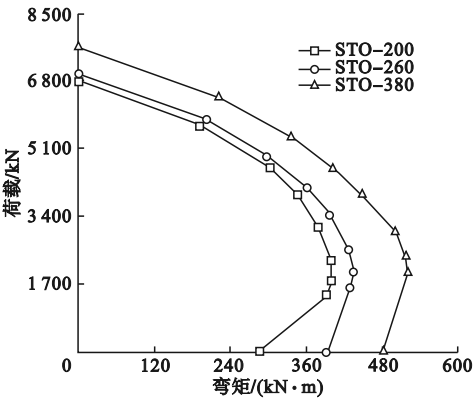


图 19 外钢管直径对荷载-弯矩曲线的影响
Fig. 19 Effects of outer steel tube diameter on the load-moment curves

4 偏压承载力计算

叠合柱达到极限承载力时,外侧钢筋混凝土与外钢管之间接触应力为 0,可采用叠加原理计算构件的承载力,即叠合柱的承载力等于外侧钢筋混凝土承载力与钢管混凝土

承载力之和^[20]。在圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱中,外围钢筋混凝土需要考虑长细比和偏心率对承载力的影响,而位于核心的中空夹层钢管混凝土受到外围钢筋混凝土的约束,可以不考虑长细比对承载力的影响,仅考虑偏心率对承载力的影响^[21-22]。

当长细比在 30~60 时,偏心受压下的圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱其正截面受压承载力 N_u 计算方法如式(1)所示,其中式(2)和式(3)由回归分析得出,式(4)和式(5)选自文献[23]。

$$N_u = \varphi_1 \varphi_{e1} (A_s f_y + A_{RC} f_{c,r}) + \varphi_{e2} N_{CFDST} \quad (1)$$

$$\varphi_1 = 1.24 - 0.0085 l_0 / i_{RC} \quad (2)$$

$$\varphi_{e1} = 1 + 0.78 \left(\frac{e}{r} \right)^2 - 1.55 \left(\frac{e}{r} \right) \quad (3)$$

$$\varphi_{e2} = \begin{cases} \frac{1}{1 + 1.85 \left(\frac{2e}{d_0 - 2t_0} \right)}, \frac{2e}{d_0 - 2t_0} \leq 1.55; \\ 0.4 \frac{d_0 - 2t_0}{2e}, \frac{2e}{d_0 - 2t_0} > 1.55. \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{CFDST} = \begin{cases} 0.9 A_{cc} f_{c,r} (1 + \alpha \theta), 0.5 < \theta \leq [\theta]; \\ 0.9 A_{cc} f_{c,r} (1 + \sqrt{\theta} + \theta), [\theta] < \theta < 2.5. \end{cases} \quad (5)$$

式中: φ_1 为外侧钢筋混凝土长细比折减系数,由回归分析得出; φ_{e1} 为外侧钢筋混凝土偏心率折减系数,由回归分析得出,该值大于 1.0 时取 1.0; A_s 为纵筋面积; f_y 为纵筋屈服强度; A_{RC} 为外围混凝土面积,当全部纵筋的配筋率大于 3% 时, A_{RC} 应改用 $(A_{RC} - A_s)$; $f_{c,r}$ 为混凝土轴心抗压强度代表值,取 $f_{c,r} = f_{ck}$; φ_{e2} 为中空夹层钢管混凝土偏心率折减系数; N_{CFDST} 为圆中空夹层钢管混凝土柱的承载力; l_0 为构件计算长度; i_{RC} 为外侧钢筋混凝土截面回转半径; e 为偏心距, $e = e_0 + l_0 / 1000$; r 为构件截面半径; d_0 为外钢管直径; t_0 为外钢管壁厚; A_{cc} 为夹层混凝土面积; α 为与混凝土强度等级有关的系数,当混凝土强度不超过 C50 时, α 取 2,当混凝土强度

在 C55~C80 时, α 取 1.80; θ 为套箍指标, $\theta = (A_{s,o} f_{y,o}) / (A_e f_{c,r})$, $A_{s,o}$ 为外钢管面积, $f_{y,o}$ 为外钢管屈服强度, A_e 为外钢管所包含空隙的面积^[16]; $[\theta]$ 为套箍指标界限值,当混凝土强度不超过 C50 时, $[\theta]$ 取 1,当混凝土强度在 C55~C80 时, $[\theta]$ 取 1.56。

圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱在极限荷载时所对应的弯矩 M_u 计算方法如式(6)所示,式(6)与《混凝土结构设计规范》GB50010—2010^[12]中的偏心受压构件弯矩计算公式形式一致。

$$M_u = C_m \eta_{ns} N_u e, \quad (6)$$

$$C_m = 0.7 + 0.3 \frac{M_1}{M_2}, \quad (7)$$

$$\eta_{ns} = 1 + \frac{1}{1300(e'/h_0)} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_c, \quad (8)$$

$$\zeta_c = \frac{0.5 f_{c,r} A_{RC}}{N_u}. \quad (9)$$

式中: M_u 为偏心受压下圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱在考虑二阶效应后的弯矩值; C_m 为构件端截面偏心距调整系数,该值小于 0.7 时取 0.7,由于 $M_1 = M_2$, C_m 取 1.0; η_{ns} 为弯矩增大系数, η_{ns} 小于 1.0 时,取 1.0; e' 为偏心距, $e' = e_0 + e_a$, e_a 取偏心方向截面最大尺寸的 1/30 和 20 mm 中较大者; h 为截面高度,对于环形截面取外直径; h_0 为截面有效高度,对于环形截面取 $h_0 = r + r_s$, r 为环形截面外半径, r_s 为纵向普通钢筋重心所在圆周半径; ζ_c 为截面曲率修正系数,该值大于 1.0 时取 1.0; A_{RC} 为环形钢筋混凝土截面面积。

采用上述方法计算得到的构件偏压承载力与模拟结果对比见图 20。 N_{us} 和 N_{uc} 分别为极限承载力(轴向荷载)的模拟值和计算值; M_{us} 和 M_{uc} 分别为极限承载力时所对应的弯矩模拟值和计算值。 N_{uc}/N_{us} 的平均值和标准差分别为 0.913 和 0.021, M_{uc}/M_{us} 的平均值和标准差分别为 0.929 和 0.056,可见该方法计算结果与模拟结果吻合较好,且计算结果偏于安全。

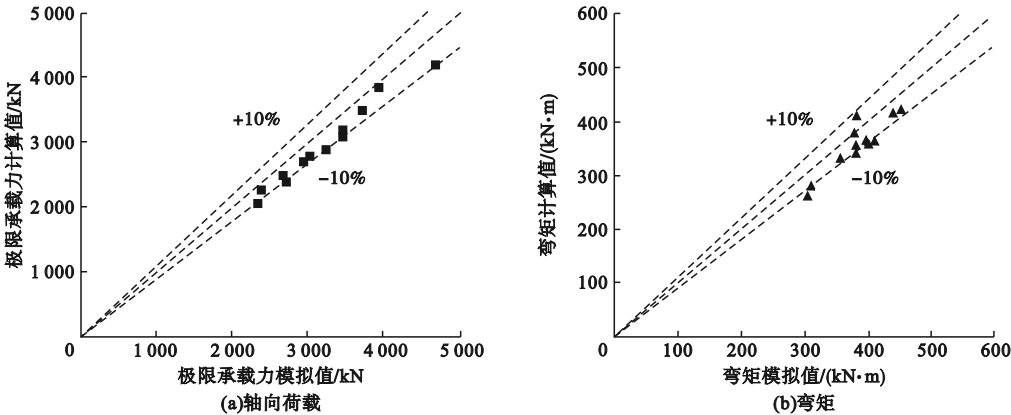


图 20 计算结果与模拟结果对比

Fig. 20 Comparisons between simulations and calculated results

5 结 论

(1) 偏心受压的圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱的受力过程可分为弹性、弹塑性和塑性 3 个阶段,构件的塑性变形集中在柱中区域。

(2) 长细比和偏心率越大,圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱的极限承载力和刚度越低,在峰值荷载时的柱中挠度也越大。长细比从 40 增加到 60 时,极限承载力和刚度分别降低 18.9% 和 35.5%;偏心率由 0.2 增加到 0.6 时,极限承载力和刚度分别降低 50.3% 和 54.6%。

(3) 增大混凝土强度或提高纵筋配筋率,会使圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱的极限承载力提高;混凝土强度由 C30 增加到 C50 时,极限承载力提高 36.3%;纵筋配筋率由 0.55% 增加到 1.92% 时,极限承载力提高 15.0%。

(4) 增大外钢管直径可以提高圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱的极限承载力,还可以提高构件的延性;当外钢管直径由 200 mm 增加到 380 mm 时,构件极限承载力提高 22.3%。

(4) 所提出圆中空夹层钢管混凝土叠合长柱偏压承载力计算方法的计算结果与有限元模拟结果吻合较好,且计算结果偏于安全。

参考文献

[1] 赵晖,张颖,王蕊. 内钢板中空方形钢管混凝土叠合柱轴压力学性能研究[J]. 建筑结构学报,2022,43(6):53-62.
(ZHAO Hui, ZHANG Ying, WANG Rui. Study on mechanical behavior of square hollow concrete-encased CFST columns with inner steel plate under axial compression [J]. Journal of building structures, 2022, 43 (6): 53-62.)

[2] AN Y F, HAN L H, ZHAO X L. Analytical behaviour of eccentrically loaded concrete-encased CFST box columns [J]. Magazine of concrete research, 2014, 66(15):789-808.

[3] HAN L H, AN Y F, ROEDER C, et al. Performance of concrete-encased CFST box members under bending [J]. Journal of constructional steel research, 2015, 106:138-153.

[4] WANG Z B, HAN L H, LI W, et al. Seismic performance of concrete-encased CFST piers: experimental study [J]. Journal of bridge engineering, 2015, 21(4):04015072.

[5] WON D H, HAN T H, KIM S, et al. Optimum confining effect in steel composite hollow RC column with inner tube under compressive load [J]. Magazine of concrete research, 2014, 66(9):433-446.

[6] 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, 43:103133.

[7] WON D, KIM S, SEO J, et al. Experimental study of composite hollow RC column under uniaxial compressive load [J]. Applied science, 2019, 9:373.

[8] 任庆新,孙明海,贾连光. 圆锥形中空钢管混凝土叠合短柱试验研究[J]. 工程力学, 2014,

- 31(12):134-139.
(REN Qingxin, SUN Minghai, JIA Lianguang. Tests on circular tapered hollow steel tube reinforced concrete stub columns [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(12):134-139.)
- [9] 任庆新,魏秋宇,王鹏,等.圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压性能研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(3):410-417.
(REN Qingxin, WEI Qiuyu, WANG Peng, et al. Research on circle hollow concrete-encased CFST slender column under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(3):410-417.)
- [10] 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.)
- [11] 东南大学.混凝土结构[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
(Southeast University. Concrete structures [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019.)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.)
- [13] 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 mechanism of concrete filled steel tubes subjected to local compression [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.)
- [14] BALTAY P, GJELSVIK A. Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress [J]. Journal of materials in civil engineering, 1990, 2(1):46-49.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for classification of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.)
- [16] 黄宏.中空夹层钢管混凝土压弯构件的力学性能研究[D].福州:福州大学,2006.
(HUANG Hong. Behavior of concrete filled double-skin steel tubular beam-columns [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.)
- [17] 清华大学.钢管混凝土叠合柱结构技术规程:T/CECS188—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
(Tsinghua University. Technical specification for steel tube-reinforced concrete column structures: T/CECS188—2019 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019.)
- [18] PARK R, PAULEY T. Reinforced concrete structures [M]. New York: Wiley, 1975.
- [19] 安钰丰.方形钢管混凝土叠合压弯构件力学性能和设计方法研究[D].北京:清华大学,2015.
(AN Yufeng. Performance and design methods of square concrete-encased CFST members under combined compression and bending [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.)
- [20] 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.
- [21] 罗才松,王枫轩,付朝江,等.圆钢管再生镍铁渣混凝土中长柱轴压性能研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2022,41(4):329-336.
(LUO Caisong, WANG Fengxuan, FU Chaojiang, et al. Study on axial compression performance of recycled aggregate concrete with ferronickel slag filled steel tubular middle long column [J]. Journal of Liaoning technical university (natural science), 2022, 41(4):329-336.)
- [22] 康洪震.钢管高强混凝土组合柱受力性能及设计方法[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
(KANG Hongzhen. Mechanical performance and design methods of steel tube high-strength concrete composite columns [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.)
- [23] 哈尔滨工业大学,中国建筑科学研究院.钢管混凝土结构技术规程:T/CECS28—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
(Harbin Institute of Technology, China Academy of Building Research. Technical specification for concrete-filled steel tubular structures: T/CECS28—2012 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)