

中空钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究

任庆新¹,丁纪楠¹,李明伦²,娄贺清³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学研究生院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 沈阳市铁西区碧桂园房地产开发有限公司, 辽宁 沈阳 110021)

摘要 研究中空钢管混凝土叠合柱偏压力学性能, 并提出承载力简化计算公式。**方法** 采用有限元软件对不同破坏模式下典型构件的荷载-挠度曲线进行分析, 定义5个特征点, 研究不同特征点处和不同破坏模式下试件的工作机理; 通过改变偏心率、钢管直径研究构件约束机理以及荷载-挠度曲线, 最后采用叠加理论和极限平衡理论提出中空钢管混凝土叠合柱偏压承载力简化计算公式。**结果** 钢管直径由60 mm增至100 mm和140 mm时, 构件极限荷载分别降低0.4%和5.8%; 偏心率由0.2增至0.5时, 极限承载力降低33%, 混凝土对内部钢管的约束作用逐渐提高; 建议的承载力简化计算公式计算结果与试验结果吻合较好。**结论** 中空钢管混凝土叠合柱在减轻自重的条件下具有较好的承载能力和延性, 可以满足工程需要。

关键词 中空钢管混凝土叠合柱; 有限元模型; 偏压; 工作机理; 承载力计算

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Research on Mechanical Properties of Hollow Concrete-Encased Concrete Filled Steel Tubes Under Eccentric Compression

REN Qingxin¹, DING Ji'nan¹, LI Minglun², LOU Heqing³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Graduate School, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Shenyang Tiexi District Country Garden Real Estate Development Company, Shenyang, China, 110021)

Abstract: Based on finite element verification with relevant experiments, the mechanical properties of hollow concrete-encased concrete filled steel tube (CFST) columns under eccentric compression are analyzed. Five characteristic points are defined in the load versus deformation curve of composite columns to investigate the mechanical behaviors under different characteristic points and failure patterns. Parametric studies are adopted to investigate the influence of the eccentric ratio and diameter of steel tube on the load versus deformation curve and the confinement mechanism of hollow concrete-encased CFST column under eccentric compression. Finally, a formula is proposed

收稿日期: 2020-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678373)

作者简介: 任庆新(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事组合结构方面研究。

to calculate the load-carrying capacity considering the influence of steel tube and its restraining action base on the theory of superposition and ultimate equilibrium. With the diameter of steel tubes increase from 60mm to 100mm and 140mm, the ultimate bearing capacity decreases 0.4% and 5.8%. With the increase of the eccentric ratio from 0.2 to 0.5, the ultimate bearing capacity decreases 33%, the confinement to the inner tube increases gradually. The proposed formula is in good agreement with the test value. The hollow concrete-encased CFST has excellent bearing capacity and ductility under the condition of reducing self-weight, which meets the need of engineering.

Key words: hollow concrete-encased CFST column; finite element modelling; eccentric compression; mechanical behavior analysis; load-carrying capacity calculation

中空钢管混凝土叠合柱是由纵筋和箍筋构成骨架、核心部位配置钢管,并在钢管外部浇筑混凝土而形成的一种结构形式,是将钢筋混凝土与钢管有机结合起来而形成的构件,也可以看作钢管混凝土叠合柱的钢管中未灌注混凝土。相比于传统中空钢筋混凝土构件,内置空钢管可改善试件的刚度和延性,因此,这种构件具有抗弯刚度大、自重轻、施工便利、防火性好等特点,适用于桥梁结构中的桥墩、高层建筑中的大直径柱、各种支架柱以及送变点杆塔等结构。

目前,针对钢管混凝土叠合柱的研究已经比较完善,主要借助试验和有限元模拟,以截面形式、含钢管混凝土率、钢管与混凝土强度等为参数进行轴压、压弯等静力性能研究,考察其力学性能,分析受力过程中管外混凝土和钢管混凝土截面应力分布规律、钢管与管外混凝土及管内混凝土之间的相互作用,基于参数分析建议钢管混凝土叠合柱偏心受压的承载力实用计算方法^[1-3]。关于中空钢筋混凝土柱的研究,主要集中在轴压性能^[4-8]和薄壁桥墩抗震性能方面^[9],关于中空钢管混凝土叠合柱的研究相对较少。基于此,笔者在已有试验的基础上,建立有限元计算分析模型,对中空钢管混凝土叠合柱偏压下的荷载-挠度全过程曲线进行分析,研究偏心率和内置钢管直径对其约束机理和承载力的影响,并结合叠加理论和极限平衡理论提出了偏压作用下的承载力简化计算公式。

1 有限元模型

1.1 模型参数

中空钢管混凝土叠合柱模型参数:高度 $H=1\,800\text{ mm}$,宽度 $B=200\text{ mm}$,内钢管直径 $D=80\text{ mm}$,钢管壁厚 $t=3\text{ mm}$,混凝土保护层厚度为 25 mm ,钢管采用 Q345B 钢材,纵筋采用 HRB335 $8\Phi 12$,箍筋采用 HPB300 $\Phi 6.5@100$,钢管外混凝土强度等级为 C40,试件参数及构造如图 1 所示。

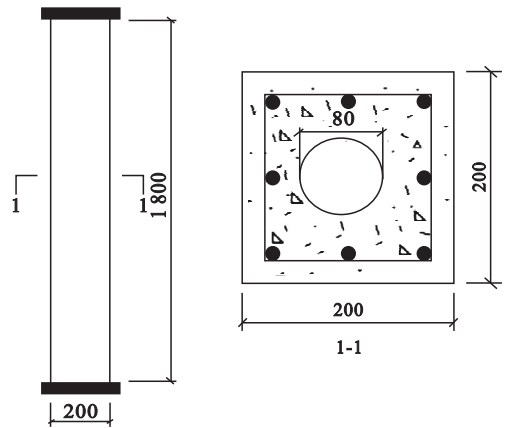


图 1 试件参数及构造

Fig. 1 Dimensions and details of specimens

1.2 材料本构模型

笔者采用弹塑性模型来建立钢材本构关系,弹性模量和泊松比分别为 206 GPa 和 0.3 . 钢管部分使用韩林海提供的五阶段应力-应变关系^[11],钢筋部分使用双折线应力-应变关系,强化阶段弹性模量取 $0.01E_s$ (E_s 表示钢材弹性模量)。混凝土本构采用

塑形损伤模型,混凝土弹性模量 E_c 。根据文献[12]取值,泊松比为 0.2。箍筋外无约束混凝土采用 M. M. Attard^[13] 提出的素混凝土本构关系模型,箍筋约束混凝土采用 L. H. Han^[2] 提出的本构关系模型。

1.3 模型建立

构件有限元计算分析模型以及各单元类型如图 2 所示。采用结构化网格划分技术对各部件进行单元网格划分。

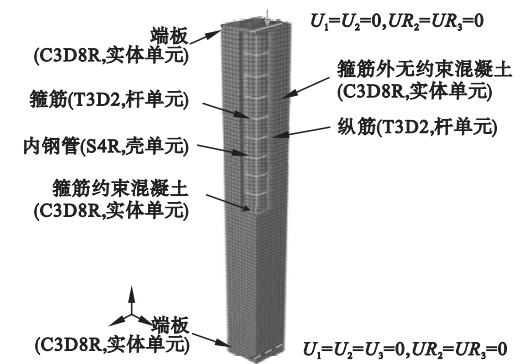


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element analysis model

钢筋内嵌于混凝土中,钢管与混凝土界面法向采用硬接触,切向采用库伦摩擦模型来模拟,摩擦系数取 0.6^[14]。将端板视为刚体,端板与混凝土端部采用绑定约束,端板与钢管端部采用壳-实体耦合,保证加载过程中钢管和混凝土与端板变形一致。试件加载点与端板结点区域的加载线耦合,对加载点约束 X、Y 方向的位移和绕 Y、Z 轴方向的转角,采用位移加载方式进行计算^[15]。

1.4 模型验证

将有限元计算结果与文献[16]中的 sc1、sc2 和 sc3 试验结果比对。承载力对比结果见图 3,图中 N_{uc} 表示试验承载力, N_{uFEA} 表示有限元模拟计算承载力。破坏形态对比见图 4。荷载-挠度曲线见图 5,图中 u_m 表示侧向挠度, P 表示荷载,同一参数进行两组试验。由图可知,有限元模型计算结果和试验结果吻合较好,因此笔者提出的有限元模型可以用来研究此类构件的受力性能。

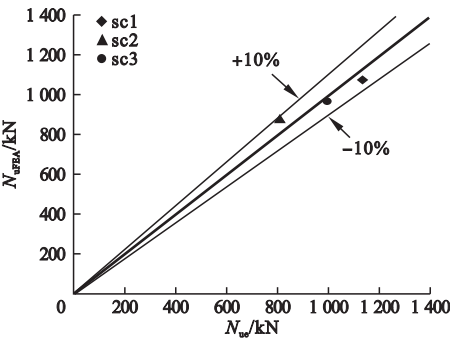


图 3 承载力对比

Fig. 3 Comparison of bearing capacities

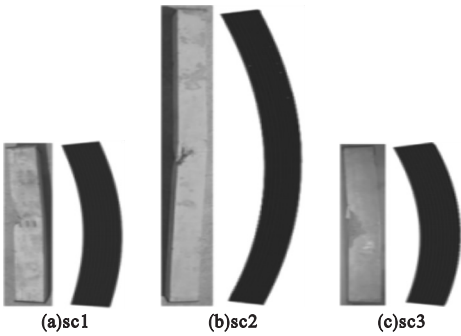
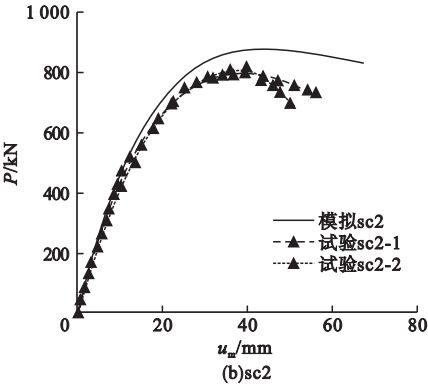
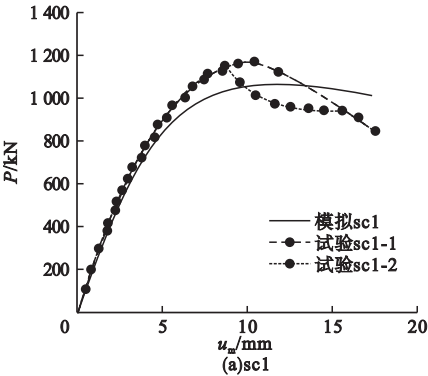


图 4 破坏形态对比

Fig. 4 Comparison of failure modes



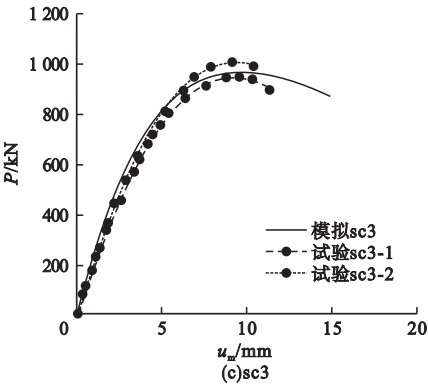


图5 荷载-挠度曲线
Fig. 5 Load-deflection curves

2 有限元分析

基于上述有限元计算分析模型,对偏压
下中空钢管混凝土叠合柱的工作机理进行研
究。构件截面形式如图1所示,具体截面参
数与试验试件一致,混凝土强度 $f_{cu}=45$
MPa,壁厚 $t=3$ mm,钢管屈服强度 $f_{ys}=345$
MPa,纵筋屈服强度 $f_{y1}=400$ MPa,纵筋直径
为12 mm,箍筋屈服强度 $f_{yh}=300$ MPa,箍筋
直径为6.5 mm,考虑钢管初始缺陷,初始偏
心距按照 $H/1\,000$ 取值^[13]。

2.1 荷载-挠度分析

中空钢管混凝土叠合柱参照钢筋混凝土
的破坏形态,外围混凝土压溃时受拉钢筋没
有屈服,为小偏压破坏;钢筋受拉屈服和试件
达到峰值荷载几乎同时发生,为界限破坏;外
围混凝土压溃时受拉钢筋已经屈服,为大偏
压破坏。通过改变偏心距 e ,得到不同破坏
模式下的荷载-位移($P-u_m$)曲线如图6所
示。图中关键点定义如下, R_c 点:受压边缘
纵筋开始屈服; R_t 点:受拉边缘纵筋开始屈
服; S_c 点:钢管受压边缘开始屈服; S_t 点:
钢管受拉边缘开始屈服; P 点:极限荷载 N_u ;
 U 点:轴力下降到85% N_u 。 $e=50$ mm时,
试件为小偏心受压破坏,破坏过程为受压区
纵筋屈服→钢管受压区边缘屈服→构件达到
峰值荷载→受拉区纵筋屈服; $e=80$ mm时,
试件为界限破坏,破坏过程为受压区纵筋屈

服→钢管受压区边缘屈服→受拉区纵筋屈服→构
件达到峰值荷载→钢管受拉区边缘屈服; $e=$
100 mm时,试件为大偏心受压破坏,破坏过
程为受压区纵筋屈服→受拉区纵筋屈服→构
件达到峰值荷载→受压区钢管屈服→受拉区
钢管屈服。

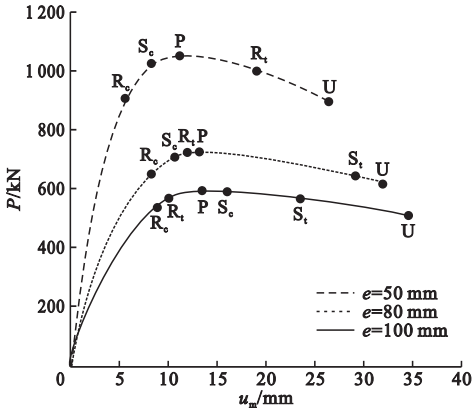


图6 荷载-挠度关系曲线
Fig. 6 Load-deflection curves

从以上分析及图6可以看出,对于小偏
心破坏试件,受拉区纵筋在试件达到其峰值
荷载之后屈服;对于界限破坏试件,受拉区纵
筋几乎和试件达到其峰值荷载同时屈服;对
于大偏心破坏试件,受拉区纵筋在试件达到
其峰值荷载之前屈服,因此可将受拉区钢筋
的屈服作为组合柱不同破坏模式的标志。随
着偏心距的增大,试件极限荷载减小,但延性
显著提高,这是由于随着偏心距的增加,钢管
逐渐由全部屈曲发展为受压单侧屈曲,部分
处于弹性阶段的钢管使试件具有一定延性。

2.2 跨中截面混凝土纵向应力分布图

试件 scl 在受力过程中特征点 R_c 、 P 、 U
处跨中截面混凝土纵向应力分布情况如图7
所示。由图可知,中和轴在加载过程逐渐向
受压侧移动,混凝土受压区面积减小。 R_c 点
处由受压侧至受拉侧纵向应力逐渐降低且分
布较为均匀; P 点处角部混凝土应力值较大,
且应力值随角部距离的增大而迅速减小。在
试件达到极限荷载时,混凝土截面高应力位
于压区角部和压区钢管处;随着跨中挠度的

进一步增加,U 点处混凝土角部和钢管两侧的应力值开始下降。

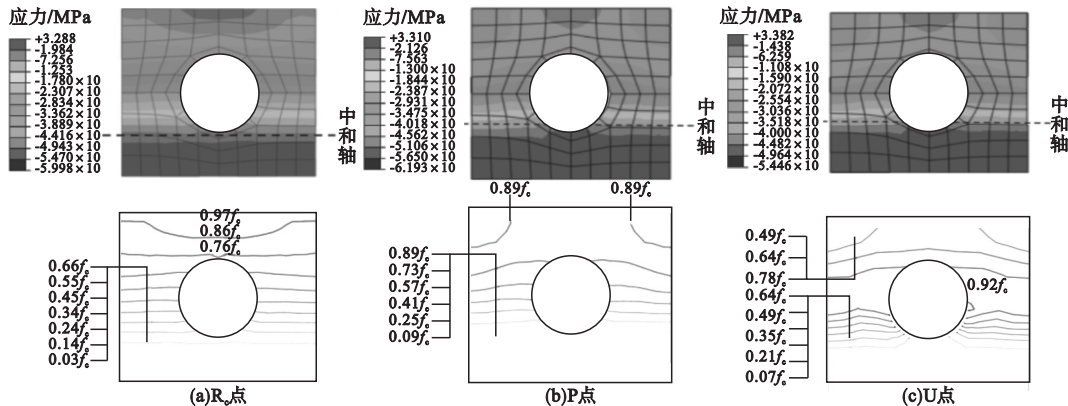


图 7 特征点处跨中截面混凝土纵向应力分布

Fig. 7 Distribution of longitudinal stress (S33) in concrete at mid-height

2.3 接触应力

接触应力即试件中钢管与混凝土之间的相互作用,反应破坏过程和约束机理。在钢管中截面选取代表点,点 1 位于钢管中截面受拉区最外边缘,点 2 位于钢管中截面受压区最外边缘(见图 8)。

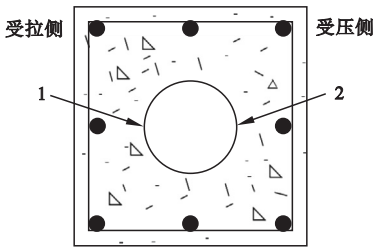
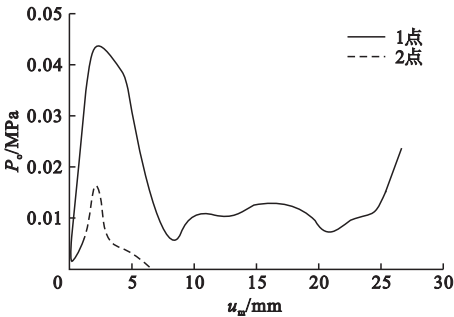


图 8 接触应力位置

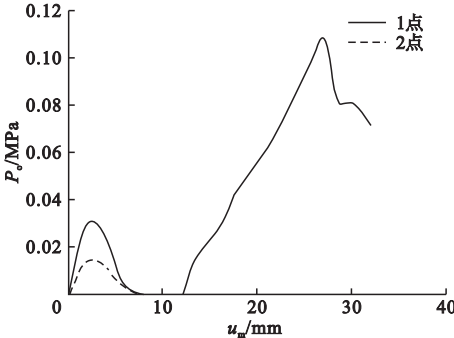
Fig. 8 Location of contact stresses

中空钢管混凝土叠合柱中截面代表点处 $P_0 - u_m$ 关系曲线如图 9 所示。图中 P_0 表示混凝土和钢管之间的接触应力,即外层钢筋混凝土对内钢管的约束作用, $P_0 > 0$ 表示钢管与混凝土之间发生相互作用, $P_0 = 0$ 表示钢管与混凝土的界面有分开趋势。

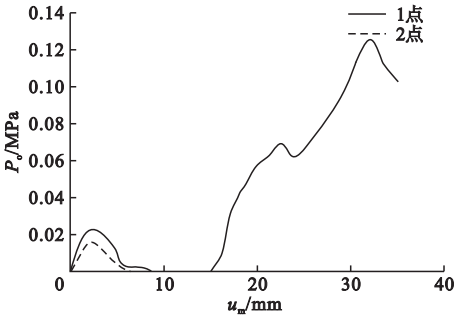
小偏心受压破坏试件的接触力 - 位移关系曲线如图 9(a) 所示。接触应力先增大后减小,压区钢管屈服先于混凝土被压碎。当压区钢管屈服时,由于钢管内部无支撑,因此压区钢管向内屈曲并与混凝土脱开;当拉区混凝土破坏时,钢管受拉侧并未屈服,且由于存在二阶效应,钢管拉区侧向变形增加,拉区



(a)小偏压破坏试件



(b)界限受压破坏试件



(c)大偏压破坏试件

图 9 不同破坏形式下接触应力 - 挠度关系曲线
Fig. 9 Interaction stress-deflection curves of different failure patterns

的接触应力逐渐增大。

界限受压破坏试件的接触力 - 位移关系曲线如图 9(b) 所示。相比小偏心受压试件,在初始阶段,接触应力明显降低,拉区混凝土破坏后和钢管脱开,内钢管拉区无混凝土约束,由于偏心距的增加,内钢管侧向挠度变形增加,因此变形后的钢管与拉区混凝土重新接触,由于压区钢管向内屈曲,压区钢管与混凝土脱开。

大偏心受压破坏试件的接触力 - 位移关系曲线如图 9(c) 所示。在初始阶段,受压区和受拉区的接触力低于界限受压破坏的试件,且由于偏心距的增加,当拉区混凝土破坏后,无约束的钢管侧向变形逐渐增加,与混凝土重新接触,且二者的接触应力随着偏心距的增加和侧向挠度的发展逐渐增大。

2.4 钢管直径对力学性能的影响

为分析内置空钢管直径对中空钢管混凝土叠合柱偏压性能的影响,笔者选取偏心距为 50 mm 试件进行研究,设置钢管直径 D 分别为 60 mm、100 mm 和 140 mm。图 10 为内置不同直径钢管的中空钢管混凝土叠合柱荷载 - 挠度曲线。从图中可以看出,随着内置钢管直径的增大,试件受压区混凝土面积降低,因此极限荷载逐渐减小,当钢管直径由 60 mm 增加至 100 mm 和 140 mm 时,极限承载力分别降低了 0.4% 和 5.8%。由于试件中含钢率的增加,刚度略微提高,钢管直径由 100 mm 增至 140 mm 时,试件刚度变化不大。

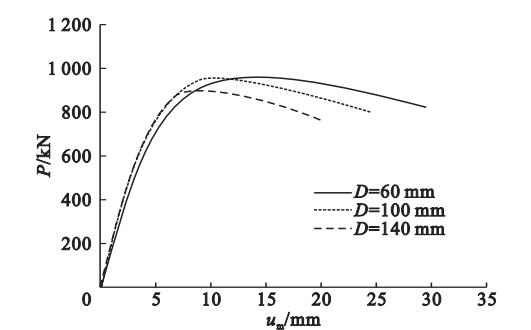


图 10 钢管直径对荷载 - 挠度影响曲线
Fig. 10 Effect of diameter of steel tubes on load-deflection curves

2.5 偏心率对力学性能的影响

图 11 为不同偏心率条件下荷载 - 挠度曲线。由图可知,偏心率对试件极限承载力的影响较明显,随着偏心率的增大,试件承受的极限荷载和刚度减小,当偏心率由 0.2 增至 0.5 时,极限承载力下降幅度最大,达到 33%,极限承载力对应的跨中挠度不断增大,试件延性随着偏心率的增大而提高。

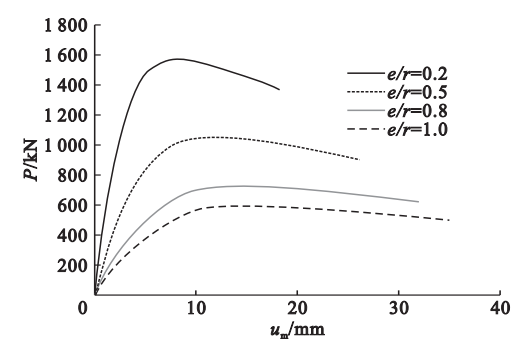


图 11 偏心率对荷载 - 挠度影响曲线
Fig. 11 Effect of eccentric ratio on load-deflection curves

3 压弯承载力计算

依据《钢管混凝土叠合柱技术规程》(CECS188—2018)^[17],管外钢筋混凝土分担的轴力设计值按照《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[18]中钢筋混凝土柱截面偏心受压承载力公式进行计算。当长细比大于 22 时,需考虑二阶效应带来附加弯矩的影响,笔者采用偏心距增大法考虑二阶效应对偏心受压承载力的影响。方形截面可按图 12 所示等效成工字型截面。

根据《钢管混凝土叠合柱技术规程》(CECS188—2018)^[17],试件大偏心受压时,仅考虑轴力对外部钢筋混凝土正截面受压承载力的影响;小偏心受压时,轴力设计值在钢管混凝土与管外钢筋混凝土之间分配。中空钢管混凝土叠合柱在偏心受压条件下的承载力参考《钢管混凝土叠合柱技术规程》(CECS188—2018)^[17],分为大偏心、小偏心两种情况进行分析。

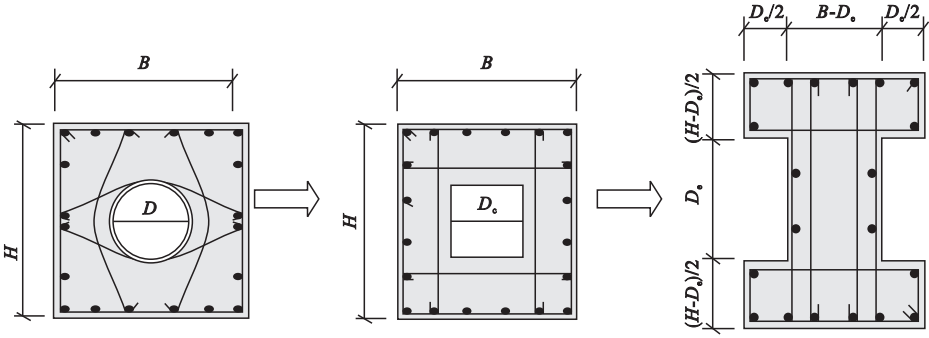


图 12 钢管外钢筋混凝土等效截面

Fig. 12 Cross-section simplification

(1) 大偏心受压

$$N_u = N_r. \quad (1)$$

$$M_u = M_r + M_s. \quad (2)$$

(2) 小偏心受压

$$N_u = N_r + N_s. \quad (3)$$

$$M_u = M_r + M_s. \quad (4)$$

式中: N_u 、 N_r 和 N_s 分别为中空钢管混凝土叠合柱、管外钢筋混凝土和内钢管承担的轴力; M_u 、 M_r 和 M_s 分别为中空钢管混凝土叠合柱、管外钢筋混凝土和内钢管承担的弯矩。

通过对偏压下中空钢管混凝土叠合柱力学性能的研究可知, 偏心率和钢管直径影响钢管和混凝土之间的接触应力, 即混凝土对内钢管的约束作用, 因此笔者提出一种钢管轴力和弯矩的简化计算公式:

$$N_s = k_1 f_{ys} A_s. \quad (5)$$

$$M_s = k_2 f_{ys} A_s D. \quad (6)$$

式中: f_{ys} 为钢管屈服强度; A_s 为钢管截面面积; D 为钢管直径。

通过回归分析得到系数 k_1 、 k_2 与偏心率 e/r 、钢管直径 D 、外钢筋混凝土截面边长 B 的拟合关系式为

$$k_1 = 1.7124(e/r)^2 + 4.6142(D/B)^2 - 7.5077(e/r)(D/B) + 1.1513. \quad (7)$$

$$k_2 = -0.1095(e/r)^2 - 1.1939(D/B)^2 + 1.2627(e/r)(D/B) + 0.6245. \quad (8)$$

采用式(1)~式(8)计算得到偏压构件承载力结果见图 13。图中 N_{uc}/N_{ue} 值的平均

值和方差分别为 0.90 和 0.004, M_{uc}/M_{ue} 值的平均值和方差分别为 0.88 和 0.003。由此可知简化计算公式与试验结果总体吻合较好, 且计算结果偏于安全, 公式能够较好地预测中空钢管混凝土叠合柱。

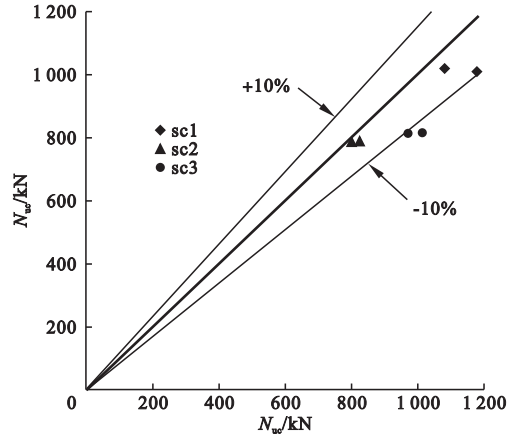


图 13 简化计算结果与试验结果对比

Fig. 13 Comparison between calculated and tested results

4 结 论

(1) 利用有限元软件计算得到的中空钢管混凝土叠合柱偏压构件的荷载-挠度关系曲线和试验曲线吻合较好。

(2) 中空钢管混凝土叠合柱偏压破坏过程与钢筋混凝土柱相似, 破坏形态分为大偏压破坏、小偏压破坏。其中以受拉纵筋屈服, 混凝土受压边缘达到极限压应变为界限破坏准则, 截面应变符合平截面假定。

(3)随着钢管直径的增加,极限承载力逐渐减小且幅度较弱,刚度基本保持不变,当钢管直径由 60 mm 增至 100 mm,刚度增加且极限承载力变化不明显;当偏心率由 0.2 增至 0.5 时,极限承载力下降 33%,试件的刚度以及极限承载力下降明显,增大偏心距,延性提高。

(4)笔者提出了中空钢管混凝土叠合柱偏压承载力计算方法, N_{uc}/N_{ue} 的平均值和方差分别为 0.90 和 0.004, M_{uc}/M_{ue} 值的平均值和方差分别为 0.88 和 0.003,计算结果与试验结果吻合良好。

参考文献

- [1] AN Y F, HAN L H. Behaviour of concrete-encased CFST columns under combined compression and bending [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 101: 314–330.
- [2] HAN L H, AN Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93: 62–76.
- [3] 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.)
- [4] KANG Y J, HAN S Y, HAN T H, et al. Nonlinear concrete model for an internally confined hollow reinforced concrete column [J]. Magazine of concrete research, 2008, 60(6): 429–440.
- [5] HAN T H, YOON K Y, KANG Y J. Compressive strength of circular hollow reinforced concrete confined by an internal steel tube [J]. Construction & building materials, 2010, 24(9): 1690–1699.
- [6] HAN T H, STALLINGSJ M, CHO S K. Behaviour of a hollow RC column with an internal tube [J]. Magazine of concrete research, 2010, 62(1): 25–38.
- [7] 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(9/10): 433–446.
- [8] WANG R, HAN L H, LAM D, et al. Behavior of octagonal steel-reinforced concrete box columns under compressive load [J]. Magazine of concrete research, 2018, 70(16): 838–855.
- [9] ZHANG Y Y, HARRIES K A, YUAN W C. Experimental and numerical investigation of the seismic performance of hollow rectangular bridge piers constructed with and without steel fiber reinforced concrete [J]. Engineering structures, 2013, 48: 255–265.
- [10] HAN T H, YOON K Y, KANG Y J. Compressive strength of circular hollow reinforced concrete confined by an internal steel tube [J]. Construction and building materials, 2010, 24(9): 429–440.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [12] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI318—11 [S]. USA: [s. n.], 2011.
- [13] ATTARD M M, SETUNGE S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. Materials journal, 1996, 93(5): 432–442.
- [14] 杨志坚, 韩嘉明, 杨军彩, 等. 空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 429–438.
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, YANG Juncan, et al. Finite element analysis of hollow circular concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 429–438.)
- [15] 徐亚丰, 金松. 钢管—圆钢管高强混凝土组合柱偏心受压有限元分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 40–50.
(XU Yafeng, JIN Song. Finite element analysis on circular steel tube composite column filled with steel-reinforced high strength concrete under eccentric loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(1): 40–50.)
- [16] 姜贺清. 方中空钢管混凝土叠合柱压弯性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(LOU Heqing. Study on compressive and flexural behavior of square hollow concrete-encased CFST columns [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [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, 2020.
(Tsinghua University. Technical specification for steel tube-reinforced concrete column structures: T/CECS188: 2019 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2020.)
- [18] 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, 2015.
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the RPC. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)