

圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压性能研究

任庆新¹,魏秋宇¹,王 鹏²,李永进³,王庆贺¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中建二局第四建筑工程有限公司,天津 300457;3. 福建江夏学院工程学院,福建 福州 350108)

摘 要 目的 建立圆中空钢管混凝土(CHCCFST)叠合长柱轴心受压有限元模型,分析关键参数对其力学性能的影响,为该类叠合构件轴压承载力的计算提供依据。**方法** 首先通过现有试验数据对有限元模型的准确性与合理性进行检验;其次利用有限元模型对典型CHCCFST叠合长柱轴压性能的荷载-柱中挠度曲线特征点进行分析,揭示不同参数下CHCCFST叠合长柱的轴压工作机理;最后基于现有规范中的稳定系数 φ 提出CHCCFST叠合长柱轴心受压承载力的简化计算公式。**结果** 混凝土强度(f_{cu})和长细比(λ)是影响圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压性能的关键参数;当混凝土强度等级由C40增加到C60与C80时,叠合长柱轴压承载力分别增加了42.4%和62.8%;当叠合柱长细比由36减少到30与24时,叠合长柱轴压承载力分别增加了31.5%和44.4%;CHCCFST叠合长柱轴压承载力简化计算结果与有限元和试验结果均符合较好。**结论** 圆中空钢管混凝土叠合长柱在轴心受压作用下具有较好的承载能力和刚度,是一种满足实际工程需要的新型叠合构件。

关键词 圆中空钢管混凝土叠合长柱;轴压性能;有限元分析;轴压承载力计算

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Research on Circle Hollow Concrete-encased CFST Slender Column under Axial Compression

REN Qingxin¹, WEI Qiuyu¹, WANG Peng², LI Yongjin³, WANG Qinghe¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. The Fourth Construction Engineering Co. Ltd., China Construction Second Engineering Bureau, Tianjin, China, 300457; 3. College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou, China, 350108)

Abstract: Axial compression performance of circle hollow concrete-encased concrete-filled steel tube (CHCCFST) slender column finite element model is established, and the parameters of axial compression behavior are studied, thus, it provides a design basis for the calculation of axial

收稿日期:2021-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51808351);辽宁省"兴辽英才计划"项目(XLYC1902027);沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC200144);辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10300110)

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

compression bearing capacity of such sections. Firstly, the accuracy of the FEM is tested and verified by the experiments result; Secondly, FE result is used to analyze the load-deflection curves of typical member. Four typical points were defined to analysis the working mechanism of CHCCFST slender columns. The influence of different parameters on the axial compression performance of members is analyzed. Finally, based on the the stability coefficient of slender columns under axial compression, the calculation formula of CHCCFST slender column is derived. The key parameters of axial compression performance are f_{cu} and λ respectively. The strength of concrete increases from C40 to C60 and C80, the axial bearing capacity increases by 42.4% and 62.8% respectively. Slender ratio decreases from 36 to 30 and 24, the axial bearing capacity increases by 31.5% and 44.4% respectively. The calculation results of the simplified formula are in good agreement with the experimental results. The CHCCFST slender column has good axial compression bearing capacity and stiffness, which can meet the needs of engineering.

Key words: CHCCFST slender column; axial compression; finite element analysis; bearing capacity of axial compression

中空钢管混凝土叠合柱 (Hollow Concrete-Encased Concrete-Filled Steel Tube, HCCFST)^[1-3]是在空心钢管外部包裹钢筋混凝土而形成的新型叠合构件。这类截面的构件具有截面易开展、抗弯刚度大等特点。这种新型结构适用于公路立交桥中的桥墩、高层建筑中的各种大尺寸框架柱、电杆塔等结构,所以该截面形式存在很大的研究与应用前景。

L. J. Li 等^[4]研究了混杂了 FRP 多重钢管混凝土叠合空心柱的轴压性能; X. Zhu 等^[5]对钢筋混凝土柱和其他几种叠合柱低速冲击轴压试验研究; R. Wan 等^[6]研究了钢管混凝土在其内配置中空 8 边形叠合柱的轴压性能; 章敏^[7]建立 GFRP 管钢筋混凝土中长柱 ANSYS 有限元模型,以 λ 、 f_{cu} 、 χ 、 t_g 共 4 个变量,得出该结构的轴压性能; 程志敏^[8]研究了圆钢管高强混凝土叠合短柱轴压力学性能,着重分析轴压全过程下 CFST 部件与 RC 部件的承载力分配,以及钢管与混凝土之间的接触作用。

基于上述分析,笔者建立了 CHCCFST 叠合长柱轴压有限元模型,以有限元模拟结果与试验结果相互验证,利用有限元软件 ABAQUS 的应力云图分析其工作机理; 讨论了长细比、混凝土强度、钢管外径和钢材强度对 CHCCFST 叠合长柱轴压受力性能的影响,

最后基于叠加理论并结合轴压长柱稳定系数法^[9]给出圆中空钢管混凝土叠合长柱轴压承载力简化计算公式,计算结果与试验结果吻合良好,表明简化公式可以很好的计算 CHCCFST 叠合长柱的轴压承载力,满足实际工程所需。

1 轴压有限元分析

1.1 模型参数信息

以 CHCCFST 叠合长柱试件编号为 AC1 建立模型, $H = 2\ 000\text{ mm}$, $D = 200\text{ mm}$; $d = 80\text{ mm}$, $t_s = 2.78\text{ mm}$, 钢管屈服强度 $f_{ys} = 378\text{ MPa}$; 纵筋采用 $\Phi 12\text{HRB}400$ 螺纹钢筋, 纵筋屈服强度 $f_{yz} = 384\text{ MPa}$, 配筋率为 0.034 3; 箍筋为 HPB300、直径 $\Phi 6.5@100\text{ mm}$ 的光圆钢筋, 箍筋屈服强度 $f_{yg} = 326\text{ MPa}$, 混凝土的设计强度为 C40, 试验用 28 天混凝土立方体抗压强度 $f_{cu} = 45.2\text{ MPa}$, 其保护层厚度为 25 mm。试件信息如图 1 所示。

1.2 材料的本构关系模型

钢筋部分应力-应变 ($\sigma - \varepsilon$) 关系采用双折线模型, 弹性模量在强化阶段取值为 $0.01 E_s$ ($E_s = 202\text{ GPa}$, $\mu_s = 0.28$); 钢管部分本构关系选用^[10]五阶段式 $\sigma - \varepsilon$ 模型。混凝土的本构关系以弹性模量 E_c 、 $4\ 730 \cdot \sqrt{f_c}$ ^[11] 建立塑性损伤模型, 无约束混凝土的本构关系

采用^[12]无约束混凝土 $\sigma - \varepsilon$ 模型,约束混凝土本构关系应用 L. H. Han 等^[13]约束混凝土 $\sigma - \varepsilon$ 模型。

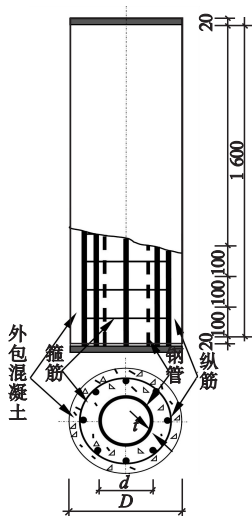


图1 试件构造图

Fig. 1 The simplified diagram of test specimen

1.3 模型的建立

1.3.1 单元类型选取

混凝土选用三维实体单元,钢管采用四节点缩减积分壳单元,箍筋与纵筋均为线性三维桁架单元。试件的有限元轴压模型详见图2。

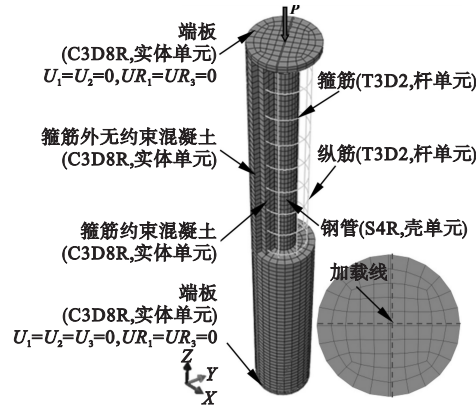


图2 轴压模型

Fig. 2 The axial compression FEM of AC1

1.3.2 边界条件、加载方式及界面接触

考虑到初始缺陷对叠合长柱轴压性能的影响,在端板中心轴偏离 X 轴方向 $L/1\,000$ ^[14]处设置加载线。应用刀铰模拟轴压受力,其边界条件如图2所示。通过设置参考点处 Z 方向的位移进行加载^[15]。钢管与端板之间采用壳 - 固耦合接触,上下两边端板与混凝土两种材料间的约束均为“绑定”,钢管与混凝土的接触分别为:切线方向的粘结滑移采用“罚”函数模拟,罚函数的摩擦系数取值为 0.6 ^[16],法线方向采用“硬”接触。

1.4 试验验证

AC1 变形破坏模态对比如图3所示。试件参数信息如表1所示。

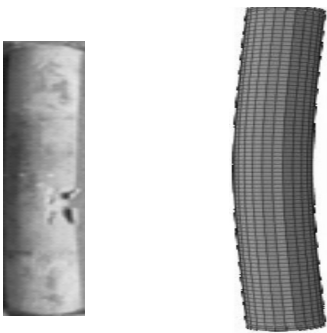


图3 试件变形模态对比

Fig. 3 Compared deformation modes with test and FEM

通过模拟 AC1 得到荷载 - 柱中挠度 ($N - u_m$) 曲线,与试验 $N - u_m$ 曲线对比如图4所示,有限元模型(FEM)模拟结果与试验结果相比初始刚度和极限承载力相近证明有限元模型的准确性。轴压承载力模拟值(N_{uFEM})与实测值(N_{uc})平均值偏差为 2.8% ,承载力对比如图5所示,承载力试验值与模拟值的比值(N_{uc}/N_{uFEM})平均值 0.972 ,标准差为 0.02 。具体计算结果见表1。

表1 试件参数信息与计算结果

Table 1 Information and result of CHCCFST

编号	$D \times H/mm$	$d \times t/mm$	N_{uc}/kN		N_{uFEM}/kN	N_{uFEM}/N_{uc}
			试验值	平均值		
AC1-1	$200 \times 1\,600$	80×2.78	1 585.27	1 613.52	1 622.41	1.023
AC1-2	$200 \times 1\,600$	80×2.78	1 641.76		1 622.41	0.988

注: N_{uc} 为试验值; N_{uFEM} 为模拟值。

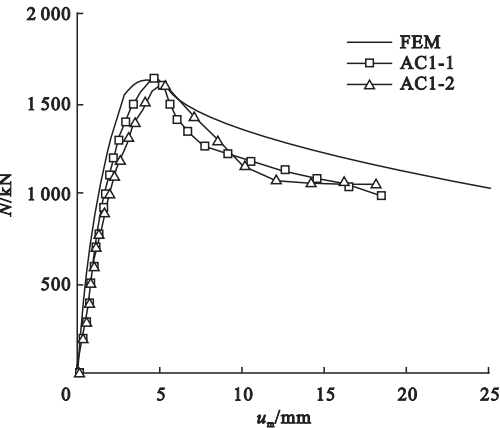


图4 试验与模拟 $N-u_m$ 曲线对比

Fig.4 Test and FE results of $N-u_m$ curves

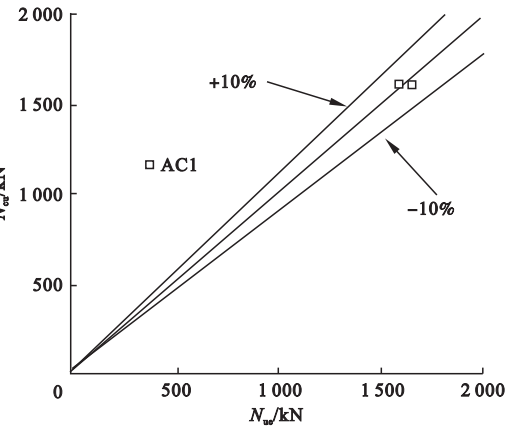


图5 承载力对比

Fig.5 The comparison results between FEM and test

2 轴压工作机理分析

将试件 AC1 作为典型算例进行荷载 - 柱中挠度 ($N-u_m$) 曲线分析。在 $N-u_m$ 曲线上选取 4 个特征点, A 点:弹性阶段的分界点; B 点:构件右侧纵筋在中截面附近出现屈服; C 点:试件承载力达到顶峰; D 点:叠合长柱构件左侧出现开裂。特征点应力分布图如图 6 所示, 应力分布图中压应力为负, 拉应力为正。将叠合长柱轴压受力全过程为为四个阶段: ①弹性阶段 I (OA), 试件整体处于弹性阶段, 叠合长柱所受荷载与柱中挠度之间呈现线性增加关系; ②弹性阶段 II (AB), 纵筋与钢管仍然处于弹性阶段, 叠合柱所受荷载与柱中挠度之间仍然呈现线性增加关系;

③弹性与塑性共存阶段 (BC), 叠合长柱所受荷载与柱中挠度之间呈现非线性增加关系, 叠合柱承载力达到最大值; ④轴压承载力下降阶段 (CD), 叠合柱所受荷载与柱中挠度之间呈现非线性下降关系, 直至加载结束。

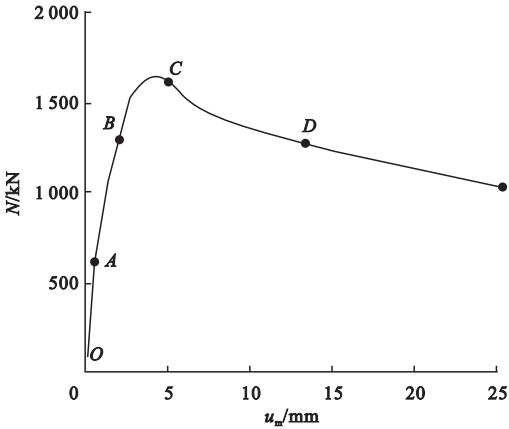


图6 轴压构件特征点示意图

Fig.6 The typical points of AC1

A 点叠合长柱纵向全部为压应力, 数值位于 11 ~ 17 MPa, 最大压应力约为最小压应力的 1.4 倍, 沿着横截面呈现带状分布, 见图 7(a)。B 点纵筋在中截面处屈服进入塑性变形阶段, 叠合柱整体纵向应力仍然全部为压应力, 构件右侧应力值大于构件左侧, 数值位于 28 ~ 43 MPa, 最大压应力约为最小压应力的 1.5 倍, 沿着横截面呈现带状分布, 见图 7(b)。C 点钢管进入塑性阶段, 整体纵向应力全部为压应力, 构件右侧应力值大于构件左侧, 构件压应力数值由右侧向左侧逐渐减小, 数值位于 36 ~ 65 MPa, 最大压应力约为

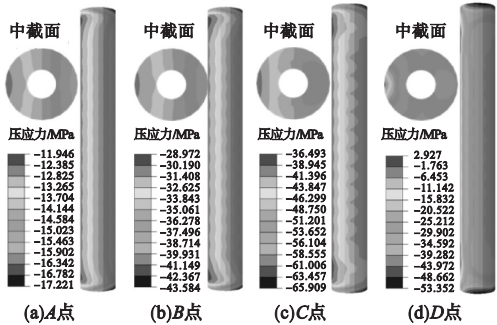


图7 特征点跨中混凝土应力分布

Fig.7 The stress distribution of concrete in typical points

最小压应力的 1.8 倍,沿着横截面呈现带状分布,见图 7(c)。D 点叠合柱左侧受拉,右侧受压。最大拉应力位于中截面附近,当荷载达到混凝土抗拉强度时混凝土开裂,见图 7(d)。

混凝土与钢管之间相互作用曲线($P-u_m$)见图 8。初期加荷,叠合柱整体为弹性,混凝土的泊松比小于钢管,两者间无接触。加荷继续,混凝土出现塑性破坏,钢管开始与混凝土产生相互作用;随着加载继续相互作用力也逐渐变大,钢筋笼在混凝土开裂后仍有约束作用,构件左侧相互作用力逐渐增大,增大的趋势先平缓后上升;构件右侧钢管与混凝土之间相互接触,随着荷载的增加,相互作用逐渐增大,增大趋势趋于平缓;由于钢管中空所以构件左侧约束应力大于构件右侧约束应力。

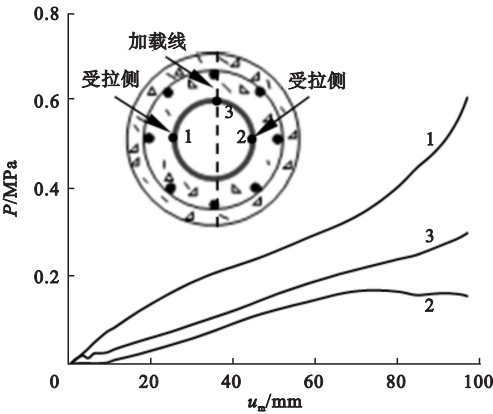


图 8 中截面处受力特征点 $P-u_m$ 曲线
Fig. 8 The $P-u_m$ curves of characteristic point at mid-section

3 轴压参数分析

选取 4 个参数:钢管外径 d ,长细比 λ ,钢管屈服强度 f_{ys} ,混凝土抗压强度 f_{cu} 。对 CHCCFST 叠合长柱的轴压性能进行参数分析,试件详细信息如表 2 所示,不同参数对构件荷载-柱中挠度($N-u_m$)曲线的影响见图 9~图 12 所示。

表 2 试件参数表

Table 2 The FE information of the specimens

试件	参数	$D \times H /$ mm	$d /$ mm	λ	$f_{cu} /$ MPa	$f_{ys} /$ MPa
0	—	200 × 1 800	80	36	40	345
1-1	d	200 × 1 800	100	36	40	345
1-2		200 × 1 800	120	36	40	345
2-1	λ	200 × 1 500	80	30	40	345
2-2		200 × 1 200	80	24	40	345
3-1	f_{cu}	200 × 1 800	80	36	60	345
3-2		200 × 1 800	80	36	80	345
4-1	f_{ys}	200 × 1 800	80	36	40	390
4-2		200 × 1 800	80	36	40	420

3.1 钢管外径

不同钢管外径下 CHCCFST 叠合长柱的荷载-柱中挠度关系曲线如图 9 所示。轴压承载力:当钢管外径由 80 mm 增加至 100 mm、120 mm 时,轴力 N 由 1 163.8 kN 增加到 1 286.3 kN、1 378.7 kN,分别增加 10.5% 和 18.5%。构件初始刚度:当钢管外径由 80 mm、100 mm 增加到 120 mm,刚度由 1 624.0 kN/mm 增加到 1 628.0 kN/mm、1 645.0 kN/mm,分别增加 0.2%、1.3%。由此,钢管外径对轴压承载力影响显著,对刚度无明显影响。

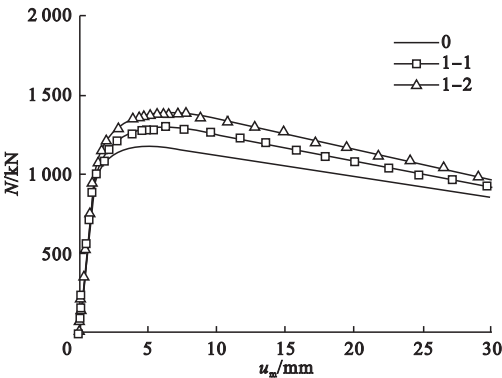


图 9 钢管外径影响下荷载-柱中挠度曲线
Fig. 9 The effect of d on axial compression performance

3.2 长细比

不同长细比下 CHCCFST 叠合长柱的荷载-柱中挠度关系曲线如图 10 所示。轴压

承载力:当长细比由 36 减少到 30、24 时,轴力 N 由 1 163.8 kN 增加到 1 530.6 kN、1 680.6 kN,分别增加 31.5 % 和 44.4%。构件初始刚度:当长细比由 36 减少到 30、24 时,刚度由 1 624.0 kN/mm 增加到 2 672.5 kN/mm、5 022.5 kN/mm,分别增加 64.5 %、209.2%。可见,长细比对轴压承载力及刚度影响显著。

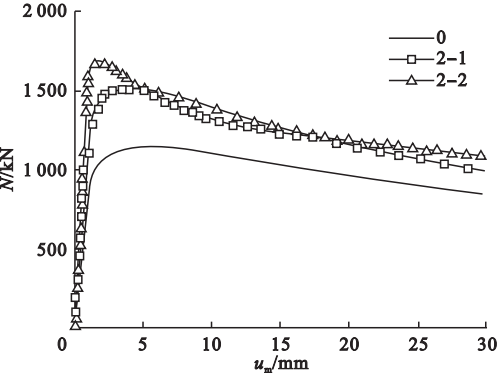


图 10 长细比影响下荷载 – 柱中挠度曲线

Fig. 10 The effect of λ on axial compression performance

3.3 混凝土抗压强度

不同混凝土强度下 CHCCFST 叠合长柱的荷载 – 柱中挠度关系曲线如图 11 所示。

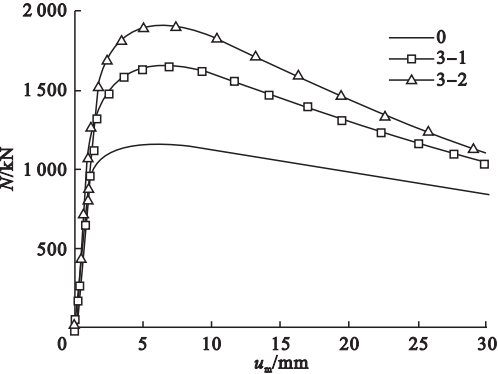


图 11 混凝土强度影响下荷载 – 柱中挠度曲线

Fig. 11 The effect of f_{cu} on axial compression performance

轴压承载力:当混凝土抗压强度由 40 MPa 增加至 60 MPa、80 MPa 时,轴力 N 由 1 163.8 kN 增加到 1 657.3 kN、1 895.1 kN,分别增大 42.4% 和 62.8%。构件初始刚度:当由 40 MPa 增加至 60 MPa、80 MPa 时,刚度由 1 624.0 kN/mm 增加到 1 772.1 kN/mm、

1 861.9 kN/mm,分别增长了 9.1%、14.6%。可见,混凝土强度对轴压承载力及刚度影响显著。

3.4 钢材屈服强度

不同钢材屈服强度下 CHCCFST 叠合柱的荷载 – 柱中挠度关系曲线如图 12 所示。轴压承载力:当钢材屈服强度由 345 MPa 增加到 390 MPa、420 MPa 时,轴力 N 由 1 163.8 kN 增加到 1 249.2 kN、1 375.5 kN,分别增大了 7.3% 和 18.2%。构件初始刚度:钢材屈服强度由 345MPa 增加到 390 MPa、420 MPa 时,刚度由 1 624.0 kN /mm 减少到 1 543.9 kN/mm、1 542.7 kN/mm,分别减小 4.9%、5.0%。可见,钢材屈服强度对轴压承载力有稍大影响,对刚度无明显影响。

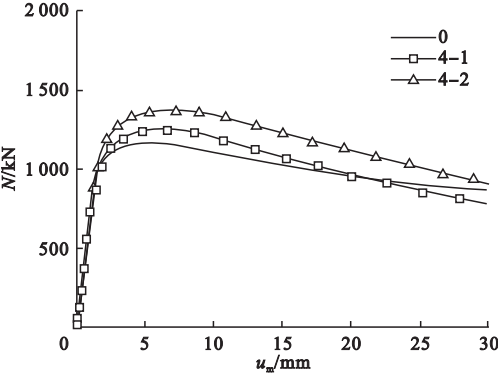


图 12 钢材强度影响下对荷载 – 柱中挠度曲线

Fig. 12 The effect of f_{ys} on axial compression performance

由以上各个参数对承载力与试件刚度的影响规律可以得出,对 CHCCFST 叠合长柱轴压承载力影响程度从大到小依次是 f_{cu} 、 λ 、 $d f_{ys}$;对圆中空钢管混凝土叠合柱刚度影响程度从大到小依次为 λ 和 f_{cu} ,其余参数几乎无影响。

4 轴压承载力计算

将 CHCCFST 叠合长柱的轴压承载力分为中空钢管 (HST) 和中空钢筋混凝土 (HRC) 两部分,进而可以得到圆中空钢管混凝土叠合构件轴压承载力的简化计算公式。

依据《钢管混凝土叠合柱结构技术规

程》(CECS188:2019)和《混凝土结构设计规范》(GBS0010—2010)计算HST部分轴力 N_s 表达式见式(1),HRC部分的轴力 N_{rc} 表达式见式(2),叠合长柱的轴压承载力 N_{uc} 见式(3)。由于长柱轴压试件发生失稳破坏引用稳定系数修正承载力计算轴压长柱的稳定系数 φ 见表3。

$$N_s=f_s\cdot A_s.$$

(1)

$$N_{rc}=f_{cu}\cdot A_c+\sum f_{yz}\cdot A_a.$$

(2)

$$N_{uc}=\varphi(N_s+N_{rc}).$$

(3)

表3 不同长度构件稳定系数取值

Table 3 The values of φ with different length

L/mm	φ	L/mm	φ
1 800	0.973	1 500	0.993
1 600	0.987	1 200	1.000

两种途径得到的AC1轴压承载力对比结果见表4。其中, N_{uc} 为计算值, N_{ue} 为试验实测值。 N_{uc}/N_{ue} 如图13所示,其平均值和均方差分别为1.053和0.026。

表4 试验件承载力计算结果

Table 4 The caculated bearing capacity of test specimens

编号	N_{uc}/kN		N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{ue}
	试验值	平均值		
AC1-1	1585.27	1 613.52	1 698.71	1.072
AC1-2	1641.76		1 698.71	1.035

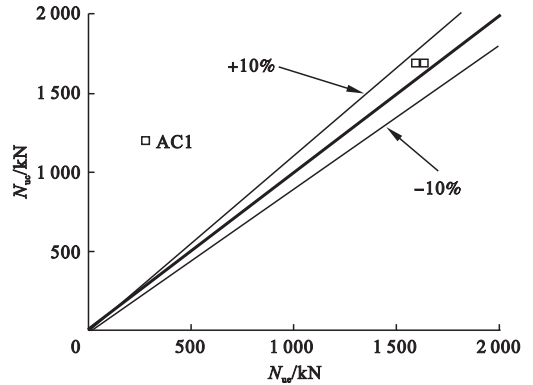


图13 公式计算值与试验结果之比 N_{uc}/N_{ue}

Fig. 13 The ratio of formula to test results(N_{uc}/N_{ue})

为了进一步验证上述公式的准确性与实用性。以上述轴压参数分析中的基本信息使用笔者提出的式(1)~式(3)计算,得到其轴压承载力计算值(N_{uc})与有限元模拟值(N_{uFEM})结果见表5, N_{uc}/N_{uFEM} 结果如图14所示。 N_{uc}/N_{uFEM} 的平均值和标准差分别为0.932和0.097。比值按照服从正态规律分布,当 N_{uc}/N_{uFEM} 置信区间为(0.857,1.007)时,其置信水平达到95%,因此笔者提出公式的计算结果可以应用到实际工程中使用。

表5 参数分析算例计算结果

Table 5 Results of parameter analysis example

试件	参数	N_{uFEM}/kN	N_{uc}/kN	N_{uc}/N_{uFEM}
0	—	1 163.848	1 248.033	1.072
1-1	d	1 286.321	1 237.585	0.962
1-2		1 378.666	1 210.760	0.878
2-1	λ	1 530.641	1 274.342	0.833
2-2		1 680.598	1 283.325	0.764
3-1	f_{cu}	1 657.311	1 548.298	0.934
3-2		1 968.079	1 877.05	0.954
4-1	f_{ys}	1 249.192	1 279.792	0.940
4-2		1 375.518	1 300.965	1.050

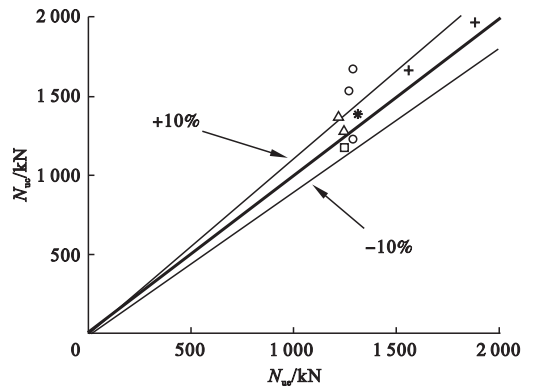


图14 计算与模拟结果之比 N_{uc}/N_{uFEM}

Fig. 14 The comparison between calculation and simulation results of N_{uc}/N_{uFEM}

5 结 论

(1)笔者建立了CHCCFST叠合长柱在轴压作用下的有限单元力学模型,模型模拟结果与试验实测结果的偏差为2.8%,比较

接近,通过该轴压有限单元力学模型的建立可以准确模拟该类构件的轴压力学性能。

(2) CHCCFST 叠合长柱轴压破坏模式与对应的钢筋混凝土长柱的破坏模式相近,在轴心压力作用下有良好的抗压承载能力和抗变形能力,柱中挠度在达到极限荷载后位移较小,后期位移发展变大。

(3)对 CHCCFST 叠合长柱轴压承载力的影响程度从大到小依次是混凝土强度、长细比、钢管外径、钢材屈服强度,对刚度影响程度较大的参数依次为长细比和混凝土强度,其余参数无显著影响。

(4)笔者基于稳定系数法提出了 CHCCFST 叠合长柱轴压承载力计算方法,计算结果与模拟结果相近似,可以满足实际工程设计使用。

参考文献

- [1] AN Y F, HAN L H. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93: 62–76.
- [2] 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.
- [3] AN Y F, HAN L H, ZHAO X L. Experimental behaviour of box concrete-encased CFST eccentrically loaded column [J]. Magazine of concrete research, 2013, 65(20): 1219–1235.
- [4] LI L J, FANG S, FU B, et al. Behavior of hybrid FRP-concrete-steel multitube hollow columns under axial compression [J]. Construction and building materials, 2020, 253: 1–11.
- [5] ZHU X, ZHAO P G, TIAN Y, et al. Experimental study of RC columns and composite columns under low-velocity impact [J]. Engineering structures, 2021, 160: 1–21.
- [6] WANG R, HAN L H, LAM D, et al. Behaviour of octagonal steel-reinforced concrete box columns under compressive load [J]. Magazine of concrete research, 2018, 70(16): 838–855.
- [7] 章敏. 中空 GFRP 管钢筋混凝土中长柱轴压力学性能研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
(ZHANG Min. Research on mechanical behaviors of the hollow medium-long reinforced concrete column confined by GFRP tube [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.)
- [8] 程志敏. 圆钢管高强混凝土叠合短柱轴压力学性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2021, 47(2): 56–62.
(CHENG Zhimin. Study on the performance of circular high strength concrete-encased concrete-filled steel tube column under axial compression [J]. Sichuan building science, 2021, 47(2): 56–62.)
- [9] 臧兴震, 何子奇, 徐创泽. 圆钢管混凝土轴压长柱极限承载力的稳定系数法[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(3): 75–82.
(ZANG Xingzhen, HE Ziqi, XU Chuangze. Stability coefficient method for ultimate strength of long concrete-filled steel tubular columns under axial compression [J]. Journal of civil and environment engineering, 2017, 39(3): 75–82.)
- [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 Linghai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.)
- [11] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI318—11 [S]. USA: [s. n.], 2011.
- [12] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(GUO Zhenhai, SHI Xudong. Principle and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [13] 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.
- [14] 徐亚丰, 金松, 戴颖, 等. 钢管—圆钢管高强混凝土组合长柱轴心受压分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2016, 38(6): 703–709.
(XU Yafeng, JIN Song, DAI Ying, et al. Finite element analysis for circular steel tube composite slender column filled with steel-reinforced high-strength concrete under axial compression [J]. Journal of Shenyang university of technology, 2016, 38(6): 703–709.)
- [15] 任庆新, 李顾, 蒋治国, 等. 椭圆形钢管混凝土长柱轴压力学性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(4): 1–6.
(REN Qingxin, LI Gu, JIANG Zhiguo, et al. Axial compression behaviour of elliptical concrete-filled steel tubular long columns [J]. Industrial construction, 2014, 44(4): 1–6.)
- [16] 任庆新, 魏秋宇, 丁纪楠. 圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(3): 437–444.
(REN Qingxin, WEI Qiuyu, DING Ji'nan. Study on circle hollow concrete-encased CFST members subject to pure bending [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(3): 437–444.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)