

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201711005



钢板笼约束混凝土组合柱正截面 偏心受压承载力分析

余文茂, 曾志兴, 林强, 刘祥

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 在 8 根偏心受压钢板笼约束混凝土组合柱试验研究的基础上, 基于箍筋的拱作用原理和方钢管混凝土承载力的计算方法, 参考混凝土结构设计规范中偏心受压柱承载力计算的相关公式, 提出钢板笼约束混凝土组合柱偏心受压情况下的正截面承载力计算方法, 并将计算结果与试验数据进行对比. 结果表明: 可采用混凝土结构设计规范提供的方法计算钢板笼约束混凝土组合柱偏心受压承载力, 理论计算结果和试验数据吻合地较好.

关键词: 钢板笼混凝土; 偏心受压; 组合柱; 承载力

中图分类号: TU 398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)03-0371-05

Normal Section Bearing Capacity Research of PCS Concrete Columns Under Eccentric Compression Load

YU Wenmao, ZENG Zhixing, LIN Qiang, LIU Xiang

(Collage of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: On the basis of experimental studies of eight concrete columns reinforced with prefabricated cage system (PCS) under eccentric load, and based on the principle of arch action of stirrup and the calculation method of bearing capacity of square concrete-filled steel tube, by comparison with the bearing capacity of columns under eccentric load in concrete structure design code, the calculation method for bearing capacity of PCS concrete columns under eccentric loading is presented, and the calculation results are compared with experimental results. The results show that the lateral confinement of PCS is similar to the confinement of concrete-filled square steel, and the calculation results agree well with the test results.

Keywords: prefabricated cage system concrete; eccentric load; composite column; bearing capacity

钢板笼混凝土结构是一种新型的钢-混凝土组合结构体系^[1], 它以钢板笼代替钢筋混凝土结构中的钢筋笼, 增强了对混凝土的横向约束作用. Shamsai 等^[2-4]提出钢板笼系统, 通过 6 根钢板笼约束混凝土缩尺短柱和 16 根钢板笼混凝土方柱的轴压试验, 证明钢板笼约束混凝土柱比普通钢筋混凝土柱有更好的抗压承载力、延性和耗能能力. 曾志兴课题组完成了 4 根钢板笼短柱的轴压试验, 并与普通的混凝土短柱进行对比, 研究配箍特征值对钢板笼混凝土柱承载力的影响, 提出钢板笼混凝土的约束应力公式^[5]. 本文在 8 根偏心受压钢板笼约束混凝土组合柱偏心受压试验的基础上, 对钢板笼混凝土组合柱进

收稿日期: 2017-11-01

通信作者: 曾志兴(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构的研究. E-mail: zhixing@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572131); 福建省自然科学基金资助项目(2017J01095); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JB-ZR1121); 华侨大学研究生科研创新能力培育计划资助项目(1611304036)

行分析,提出钢板对钢板笼混凝土组合柱的横向约束作用模型和钢板笼约束混凝土组合柱大、小偏心受压情况下的正截面承载力计算方法。

1 钢板笼混凝土约束模型

钢板笼混凝土组合柱在钢板箍的横向约束作用下,核心区混凝土受力情况与方钢管混凝土相似,处于三向受力状态,核心区混凝土抗压强度提高。

1.1 钢管约束核心混凝土抗压强度

钢板笼约束混凝土组合柱柱截面核心区域混凝土的强度采用 Mander 模型建议的公式计算^[6],即

$$f'_{cc} = f_{co}(-1.254 \sqrt{1+7.94f'_1/f_{co}} - 2f'_1/f_{co}). \tag{1}$$

式(1)中: f'_{cc} 为约束混凝土抗压强度; f_{co} 为无侧压混凝土强度; f'_1 为有效侧向约束应力, $f'_1=f_1\times k_e$, f_1 为钢板箍提供的侧向约束应力, k_e 为约束系数,主要受钢板箍约束形式的影响。

1.2 钢板笼约束作用下有效侧向约束应力

1.2.1 钢板箍提供的侧向约束应力 假设钢板箍对核心混凝土的约束应力沿钢板壁均匀分布,将钢板笼约束混凝土柱沿纵向切开,以钢板笼为对象进行分析,如图 1 所示。钢板箍作用下核心混凝土的平均侧向应力为

$$\sigma = 2f_1/((b_2-2t)s). \tag{2}$$

式(2)中: σ 为钢板箍对核心混凝土的平均侧向应力; f_1 为钢板箍的环向拉应力, $f_1=A_{sv}f_{yv}$, f_{yv} 为钢板的屈服强度, A_{sv} 为钢板笼切开后沿竖向的截面面积; t 为钢板的厚度; s 为钢板笼竖向的间距; b_2 为钢板笼的边长。

钢板箍提供的侧向约束应力为

$$\sigma = 2f_{yv}A_{sv}/((b_2-2t)s). \tag{3}$$

结合箍筋配箍特征值的计算方法,有

$$\lambda_v = 4f_{yv}A_{sv}b_2/(sb_1^2f_c). \tag{4}$$

结合式(3),(4),钢板笼提供的侧向约束应力为

$$\sigma = \lambda_v b_1^2 f_c / (2b_2(b_2-2t)). \tag{5}$$

式(5)中: b_1 为柱的边长。

1.2.2 约束系数 梁扬滨等^[7]提出对于钢板箍约束系数 k_e ,主要考虑钢板箍形式影响系数 α_n 和钢板箍间距影响系数 α_s ,即

$$k_e = \alpha_n \times \alpha_s. \tag{6}$$

张正国^[8]对方形钢管混凝土柱承载力机理进行分析,得出方形钢管混凝土柱中钢板对混凝土约束同样存在有效区和薄弱区。因此,在钢板箍约束形式下,钢板箍形式影响系数 α_n 可取有效约束核心混凝土面积 A_{en} 与核心混凝土截面面积 A_{xv} 的比值。

采用周绪红等^[9]提出的方钢管混凝土核心混凝土的约束模型,约束模型如图 2 所示。图 2 中:核心混凝土距角部 $0.1d$ 范围内为有效约束区;边缘 $0.8d$ 范围内为非约束区,非约束区的抛物线为 $1/4$ 圆弧。

结合钢板箍的开孔情况,钢板箍形式影响系数为

$$\alpha_n = 1 - 0.181nd^2/b_2^2. \tag{7}$$

式(7)中: n 为每横排开孔个数; d 为开孔尺寸。

图 3 为文献[10]提出的箍筋约束混凝土的拱作用模型。由图 3 可知:箍筋间距产生的约束薄弱区成抛物线分布,最高位置处于竖向两箍筋中间位置,高度为箍筋间距的一半。对于钢板笼组合柱,纵向的混凝土弱约束区抛物线高度取钢板间距 s 的 $1/4$,即

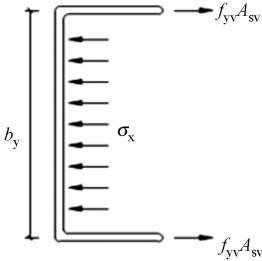


图 1 计算简图

Fig. 1 Calculation diagram

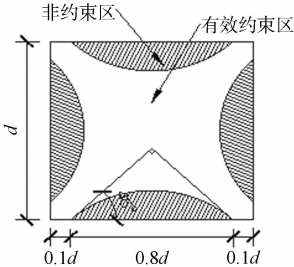


图 2 方钢管对混凝土平面约束

Fig. 2 Square tube plane confinement on concrete

$$\alpha_s = \frac{A_{es}}{A_{xy}} = \left[(b_x - \frac{s}{4})(b_y - \frac{s}{4}) \right] / (b_x b_y). \quad (8)$$

有效侧向约束应力公式为

$$f_1' = f_1 \times k_e. \quad (9)$$

由 $b_x = b_y = b_2$, 钢板笼约束作用下有效侧向约束应力为

$$f_1' = (1 - 0.181 \frac{nd^2}{b_2^2}) \frac{\lambda_v b_1^2 f_c}{2b_2(b_2 - 2t)} (1 - \frac{s}{4b_2})^2. \quad (10)$$

1.3 偏心受压作用下侧向约束应力

钢板笼混凝土组合柱在偏心受压作用下, 钢板对混凝土的侧向约束分布不均匀, 侧向约束呈梯度变化. 计算过程中采用以下方式简化计算.

1) 大偏心受压时, 混凝土一部分受拉, 混凝土处于三向异号应力状态, 降低了钢板的约束作用, 故计算时偏安全地不考虑钢板对混凝土的约束作用, 核心区混凝土抗压强度取 $f_{cc} = f_{co}$.

2) 小偏心受压时, 李四平^[11]对偏心受压方钢管混凝土柱的研究提出方钢管混凝土偏压柱在受压区也存在紧箍效应而使核心混凝土强度提高, 核心混凝土的本构关系与轴压短柱相同. 故钢板笼混凝土组合柱偏心受压计算过程中, 钢板对混凝土的约束作用可近似取与轴压短柱相同, 核心区混凝土抗压强度取 $f_{cc} = f'_{cc}$.

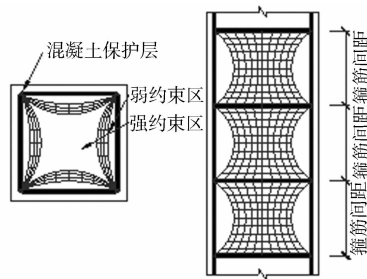


图 3 拱作用模型

Fig. 3 Model of arch action

2 钢板笼混凝土组合柱偏心受压承载力的计算方法

2.1 正截面承载力计算的基本假定

对正截面承载力的计算基于以下 5 个假定. 1) 钢板笼混凝土组合柱偏心受压时, 符合平截面假定. 2) 承载力计算中, 不考虑混凝土的抗拉强度. 3) 钢板的应力-应变采用理想弹塑性模型, 计算过程中, 钢板屈服强度取实测值 287 MPa, 弹性模量 E_s 取实测值 190 GPa. 4) 受压区混凝土的应力-应变关系采用 GB 50010-2010《混凝土结构设计规范》^[12] 规定的应力-应变曲线. 5) 计算过程中, 将两侧面中部的纵向钢板强度用混凝土代替, 使计算结果偏于安全.

2.2 偏心距

由于试件浇筑误差和材料的不均匀等原因, 钢板笼混凝土组合柱偏心受压中不可避免产生附加偏心距, 故在计算过程中应考虑轴向压力在偏压方向存在的附加偏心距 e_a . 截面的初始偏心距 $e_i = e_0 + e_a$, 附加偏心距 e_a 取 20 mm 和偏心方向截面尺寸的 1/30 两者中的较大值.

2.3 二阶效应

柱的长细比较大时, 即 $l_c/i > 34 - 12(M_1/M_2)$, 由于柱自身挠曲变形影响, 产生 $p-\delta$ 效应使柱中间段弯矩增大, 可能使柱中间段弯矩超过柱端控制截面弯矩. 采用柱端弯矩增大考虑二阶效应的影响, 即

$$C_m = 0.7 + 0.3M_1/M_2. \quad (11)$$

由于试件在加载过程中不存在侧向荷载, 故 $C_m = 1.0$. 柱端弯矩为

$$M = C_m \eta_{ns} M_2, \quad (12)$$

$$\eta_{ns} = 1 + \frac{1}{1300(M_2/N + e_a)h_0} \left(\frac{l_c}{h} \right)^2 \zeta_c. \quad (13)$$

式(13)中: $\zeta_c = 0.5f_c A/N$. 由于式中的承载力设计值 N 未知, 故 ζ_c 无法直接求出, 计算中采用反复迭代的方法. 假设一初始的 ζ_c , 计算对应的承载力设计值 N_1 ; 以初始假设的 ζ_c 值进行后续计算, 得出承载力设计值 N , 用重新计算的 N 重新计算 ζ_c ; 再重新迭代计算 N , 直到两次计算的 N 值相差很小为止. 初始 ζ_c 的计算可采用张育智等^[13] 提出的估算公式, 即 $\zeta_c = 0.2 + 2.7e_0/h_0$.

2.4 大小偏压的判断

计算中大小偏心判断与普通混凝土结构类似, 由柱的界限破坏偏心距 $e_{0,b}$ 与柱的偏心距进行比较判断. 当 $e \leq e_{0,b}$ 时, 试件为小偏心受压破坏; 当 $e > e_{0,b}$ 时, 试件为大偏心受压破坏.

当偏心破坏时, 由柱截面上的轴力和对受拉钢板合力中心取矩的平衡, 有

$$N_b = f_{cc} b \xi_b h_0 + f'_y A'_s - f_y A_s,$$

(14)

$$M_b = N_b e_{0,b} = 0.5 f_{cc} b \xi_b h_0 (h - \xi_b h_0) + 0.5 f'_y A'_s (h - 2\alpha'_s) + 0.5 f_y A_s (h - 2\alpha_s),$$

(15)

$$e_{0,b} = \frac{0.5 f_{cc} b \xi_b h_0 (h - \xi_b h_0) + 0.5 f'_y A'_s (h - 2\alpha'_s) + 0.5 f_y A_s (h - 2\alpha_s)}{f_{cc} b \xi_b h_0 + f'_y A'_s - f_y A_s}.$$

(16)

界限相对受压区高度为

$$\xi_b = \beta / (1 + f_y / (\epsilon_{cu} E_s)).$$

2.5 偏心受压柱的计算

钢板笼约束混凝土组合柱在偏心荷载作用下受力和变形情况与普通混凝土结构相似,以核心区混凝土受压强度 f_{cc} 代替偏压柱承载力计算公式中的 $f_c^{[12]}$.

2.5.1 大偏心受压计算 大偏心受压破坏时,柱受拉区纵向钢板应力达到屈服应力 f_y ,即

$$A'_s = A_s, \quad f'_y = f_y.$$

由柱截面上的轴力和对受拉钢板合力中心取矩的平衡,有

$$N = f_{cc} b h_0 \xi,$$

(17)

$$Ne = f_{cc} b h_0^2 \xi (1 - 0.5 \xi) + f_y A_s (h_0 - \alpha'_s).$$

(18)

联立式(17),(18),可得承载力.

2.5.2 小偏心受压计算 小偏心受压破坏时,柱距离轴向力较远一侧的纵向钢板中应力 $\sigma_s < f_y$,此时,由柱截面上的轴力和对受拉钢板合力中心取矩的平衡,有

$$N = f_{cc} b h_0 \xi + f'_y A'_s - \frac{\xi - \beta_1}{\xi_b - \beta_1} f_y A_s,$$

(19)

$$Ne = f_{cc} b h_0^2 \xi (1 - 0.5 \xi) + f_y A_s (h_0 - \alpha'_s).$$

(20)

联立式(19),(20),可得承载力.

3 模型验证

采用 8 根钢板笼约束混凝土组合柱进行试验,试件的截面尺寸均为 250 mm×250 mm,混凝土保护层厚度为 25 mm,混凝土强度等级为 C30,钢板笼试件如图 4 所示.试件中,钢板笼采用 Q235 级方钢管加工而成,屈服强度 $f_y = 287$ MPa.试件具体的设计参数,如表 1 所示.表 1 中: e_0 为轴向压力对截面重心的偏心距; l_0/h 为柱的长细比.

根据文中的计算方法,分别计算试验中的 8 根钢板笼混凝土组合柱的偏心受压承载力,计算 8 个试件的极限承载力(N_c),并与承载力试验值(N_u)进行对比,计算结果如表 2 所示.表 2 中: e 为轴向压力作用点至钢板笼合力点的距离.由表 2 可知:计算结果与 8 根试验柱的试验结果吻合良好;试件 PCS-7 由于试件开孔较大,试验中出现误差问题,计算结果与试验的承载力结果存在较大的误差;试件 PCS-4,PCS-5,PCS-6 计算结果满足随长细比增大,柱承载力减小的规律.



图 4 钢板笼试件
Fig. 4 Specimens of prefabricated steel cage

表 1 试件主要参数
Tab. 1 Parameters of specimens

试件编号	e_0 /mm	l_0/h	纵向含钢率/%	开孔尺寸/mm	λ_v 设计值
PCS-1	30	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-2	60	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-3	90	6	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-4	60	4	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-5	60	8	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-6	60	10	2.76	21-61-36-61-21	0.236
PCS-7	60	6	2.07	16-70-28-70-16	0.236
PCS-8	60	6	3.38	26-53-42-53-26	0.236

表 2 承载力计算结果与试验结果比较

Tab. 2 Comparison between calculation results of bearing capacity and test results

试件编号	f_{cc}/MPa	e/mm	N_u/kN	N_c/kN	N_u/N_c
PCS-1	35.70	150	1 398	1 305	1.071
PCS-2	35.70	180	1 107	1 012	1.094
PCS-3	20.56	210	746	733	1.018
PCS-4	35.70	180	947	1 012	0.936
PCS-5	35.70	180	856	874	0.979
PCS-6	35.70	180	985	796	1.237
PCS-7	35.10	180	738	932	0.792
PCS-8	36.25	180	1 217	1 212	1.004

4 结论

- 1) 试验结果和计算结果的对比表明:8 根试件中,PCS-3 为大偏心受压破坏,其余 7 根试件均为小偏心受压破坏,计算结果与试验结果吻合,计算方法可准确地判定试件的破坏形式.
- 2) 提出钢板笼混凝土的横向约束作用模型,并以此计算钢板笼混凝土组合柱核心混凝土强度,计算结果与试验结果吻合,计算模型能准确地计算核心混凝土强度.
- 3) 依据规范规定的钢筋混凝土柱大、小偏压的计算方法,分别给出钢板笼混凝土组合柱大、小偏压两种情况下承载力的计算方法,计算结果与试验结果吻合良好.

参考文献:

[1] SHAMSAI M,WHITLATCH E,SEZEN H. Economic evaluation of reinforced concrete structures with columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2007,133(11): 864-870.

[2] SHAMSAI M,SEZEN H. Fast and easy concrete construction using innovative steel reinforcement[C]//Construction Research Congress. San Diego:ASCE,2005;1-10. DOI:10.1061/40754(183)63.

[3] SHAMSAI M. Prefabricated cage systems for reinforced concrete member[D]. Columbus:The Ohio State University,2006.

[4] SHAMSAI M,SEZEN H. Behavior of square concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Materials and Structures,2011,44(1):89-100. DOI:10.1617/s11527-010-9611-y.

[5] 李飞. 钢板笼混凝土短柱的轴压性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2012.

[6] MANDER J B,PRIESTLEY M J N,PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering,1988,114(8):1807-1826.

[7] 梁扬滨,曾志兴,苏江林,等. 钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2014,35(5):576-580. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.2014.05.0576.

[8] 张正国. 方钢管混凝土柱的机理和承载力的分析[J]. 工业建筑,1989,19(11):2-7.

[9] 周绪红,甘丹,刘界鹏,等. 方钢管约束钢筋混凝土轴压实验研究与分析[J]. 建筑结构学报,2011,32(2):68-74.

[10] SHEIKH S A,UZUMERIS M. Analytical model for concrete confinement in tied columns[J]. ASCEJ Structural Division,1982,108(12):2703-2722.

[11] 李四平,霍达,黄玉盈,等. 偏心受压方钢管混凝土柱极限承载力的计算[J]. 建筑结构学报,1998,19(1):41-51.

[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:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[13] 张育智,何伟. 钢筋混凝土偏心受压构件截面极限承载力影响因素研究[J]. 四川建筑科学研究,2011,37(6):70-74. DOI:10.3969/j.issn.1008-1933.2011.06.017.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)