

钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力分析

梁扬滨, 曾志兴, 苏江林, 谌意雄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了研究新型结构构件钢板笼混凝土短柱的轴心受压承载力, 在已有受约束混凝土本构关系基础上, 根据箍筋约束混凝土的拱作用原理, 对钢板笼套箍约束混凝土承载力进行分析, 推导出钢板笼混凝土轴压短柱的承载力公式, 并将计算结果与试验数据进行对比. 研究表明: 钢板笼对混凝土的横向约束与钢管混凝土相似, 纵向连接成角钢约束力强, 模型计算结果和试验数据吻合较好.

关键词: 钢板笼; 轴压短柱; 约束混凝土; 承载力

中图分类号: TU 360.2

文献标志码: A

钢板笼混凝土结构(简称 PCS)是由美国学者 Mohanmmad Shamsai 和 Halil Sezen 于 2005 年提出来的新型预制混凝土结构, 其特点是用钢板代替钢筋, 纵向钢板和横向钢板连成一个整体. 与钢管混凝土相比, 钢板笼可节省材料. 与钢筋混凝土相比, 钢板笼纵横向钢板尺寸精确. 在钢板笼混凝土柱构件中, 纵向钢板提供轴向承载力, 横向钢板约束核心混凝土, 通过控制开孔尺寸、开孔间距、钢板厚度调整配筋率, 满足试验和设计的要求^[1-2]. 钢板笼混凝土是一种介于钢管混凝土和钢筋混凝土之间的结构体系. 目前, 钢管混凝土主要用于受压构件中, 具有较好的三向受压性能, 其核心区混凝土抗压强度高, 钢管内部的混凝土可以有效防止钢管发生局部屈曲. 钢管对混凝土约束可从两方面分析. 1) 基于统一理论, 结合极限平衡理论和叠加原理, 考虑不同套箍系数对钢管混凝土短柱承载力的影响. 舒赣平等^[3]讨论了不同套箍系数和配筋率作用下, 配筋圆钢管的极限承载力. 张志强等^[4]将统一理论推广应用到复合钢管混凝土柱轴压强度计算中, 考虑不同钢管内型钢截面形式, 提出了组合等效配箍系数. 2) 分析钢管对混凝土的有效约束面积, 通过钢管对混凝土的有效约束系数, 讨论钢管混凝土极限承载力. 张正国^[5]分析了方钢管混凝土应力分布和约束机理, 讨论钢管宽厚比对方钢管混凝土承载力的影响. 周绪红等^[6]采用弹塑性应力分析方法对钢管进行全过程应力分析, 并提出钢管约束钢筋混凝土的轴压承载力公式. 钢板笼和钢管对混凝土约束的区别在于钢板笼侧面开孔形成角钢, 使其对混凝土约束弱于钢管, 相比钢筋混凝土, 钢板笼对混凝土具有更高约束力. 本文基于开孔钢管对核心区混凝土的约束作用, 分析钢板笼混凝土短柱受力特性及核心混凝土约束影响, 并与 4 个钢板笼混凝土短柱轴压试验进行对比验证.

1 核心区混凝土约束模型

1.1 钢管约束核心混凝土抗压强度

在受压混凝土短柱截面核心区域, 由于横向钢板对混凝土的约束作用, 混凝土趋于三向受压状态, 其抗压强度极限承载力得到很大地提高. 根据蔡绍怀教授^[7]提出的钢管约束核心混凝土抗压强度本构关系, 即

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 1.5 \sqrt{\frac{P}{f'_{co}}} + 2 \frac{P}{f'_{co}} \right). \quad (1)$$

收稿日期: 2013-12-26

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

基金项目: 国家自然科学基金培育计划专项(JB-ZR1121)

式(1)中: f'_{cc} 为核心区混凝土抗压强度值; f'_{co} 为混凝土弱约束区强度值, 一般取单轴混凝土标准抗压强度值; $P = k_e \times f_1$, P 为箍筋约束有效侧向约束应力, f_1 为箍筋提供的侧向约束应力, k_e 为约束系数。

1.2 箍筋约束混凝土柱模型

Sheikh 等^[8]提出了箍筋约束混凝土的拱作用原理。在轴向压力作用下, 核心区混凝土产生横向变形使箍筋的水平线段产生弯曲, 由于箍筋中间抗弯刚度较小, 对核心区混凝土的反作用力也较小, 形成了弱约束区。箍筋转角部刚度较大, 变形较小, 对核心区域混凝土的约束作用力强, 箍筋由于自身约束差, 使其被约束混凝土形成“拱作用”。柱截面中间部分和指向箍筋转角部的延伸带形成混凝土的强约束区, 即箍筋对混凝土的有效约束区面积, 如图 1 所示。柱的纵向剖面图上, 相邻箍筋之间混凝土截面所处的高度位置不同, 混凝土核心区域面积大小也不同, 在相邻箍筋的中间位置截面处, 受约束区域的面积最小。张正国^[5]对方形钢管混凝土柱的机理和承载力进行分析, 认为钢管对核心混凝土侧向压力, 在角点处集度最大, 各个边中点处集度最小, 且趋于零。通过实验分析验证: 钢板对混凝土约束存在有效区和薄弱区。

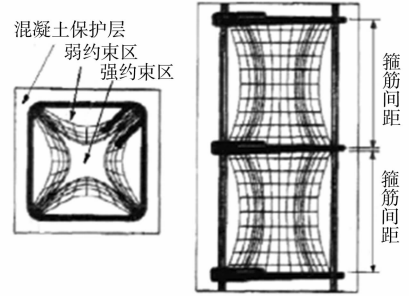


图 1 拱作用模型

Fig. 1 Model of arch

2 钢板笼约束混凝土强度分析

2.1 钢板笼混凝土短柱侧向约束应力

横向钢板约束混凝土的计算简图, 如图 2 所示。假设箍筋已经屈服, 混凝土的平均水平应力沿着箍筋均匀分布, 根据计算简图可得

$$\sigma_x = 2f_{yv}A_{sv}/sb_y, \quad (2)$$

$$\sigma_y = 2f_{yv}A_{sv}/sb_x. \quad (3)$$

式(2)~(3)中: f_{yv} 为屈服强度; σ_x, σ_y 分别为在 X, Y 轴方向约束混凝土的单向应力; A_{sv} 为箍筋截面面积; b_x, b_y 分别为约束混凝土沿 X 轴、 Y 轴的边长; s 为箍筋间距。结合箍筋配箍特征值和体积配箍率计算公式^[9], 可得

$$\lambda_v = \frac{2A_{sv}f_{yv}(b_x + b_y)}{sb_y \times f_c b_x}. \quad (4)$$

将式(4)与式(2), (3)结合, 推导出

$$\sigma_x = \lambda_v f_c \times \frac{b_x}{b_x + b_y}, \quad (5)$$

$$\sigma_y = \lambda_v f_c \times \frac{b_y}{b_x + b_y}. \quad (6)$$

若横向钢板笼为 $b_x = b_y$, 则钢板提供的侧向约束应力为

$$f_1 = \sigma_x = \sigma_y = \lambda_v f_c \times \frac{1}{2}. \quad (7)$$

2.2 钢板笼混凝土短柱约束系数分析

根据式(1)中采用的约束系数分析有效约束应力, 结合钢板笼构件的实际模型, 考虑钢板笼配箍形式对混凝土约束的影响。即分析钢板箍形式影响系数 α_n 和钢板箍间距影响系数 α_s , 则钢板箍约束混凝土有效系数为

$$k_e = \alpha_n \times \alpha_s. \quad (8)$$

式(8)中: k_e 为考虑钢板笼有效约束混凝土面积与核心混凝土面积之比的影响系数; α_n 为钢板箍形式影响系数; α_s 为钢板箍间距影响系数。

2.2.1 钢板箍形式影响系数 α_n 取钢板箍约束受压区混凝土面积为 $A_{xy} = b_x \times b_y$, 有效约束核心混凝土面积 A_{en} , 则钢板箍形式的影响系数为箍筋截面有效约束截面面积与核心混凝土截面面积的比值, 即

$$\alpha_n = A_{en}/A_{xy}. \quad (9)$$

根据 Sheikh 提出的拱作用理论, 截面可分为箍筋对混凝土有效约束区和弱约束区, 如图 3 所示。

Mander 等^[10]对箍筋约束混凝土的模型划分以 45°初始角的二次曲线为分界线,其中弱约束区可近似取为等腰三角形,高度取底边三角形边长的 1/3. 因此,对混凝土有效约束面积取箍筋约束总面积减去弱约束区,即

$$A_{\text{en}} = A_{xy} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times l_i^2, \tag{10}$$

$$\alpha_n = \frac{A_{\text{en}}}{A_{xy}} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1}{6} \times \frac{1}{A_{xy}} \times l_i^2. \tag{11}$$

周绪红等^[6]认为方钢管对核心混凝土的有效约束区为距角部 0.1*d* 的范围,而边缘 0.8*d* 范围内为非约束区,非约束区的抛物线为 1/4 圆弧,如图 4 所示. 在截面形式上,钢板笼与钢管更为相似. 因此,钢板笼横向钢板对核心混凝土的约束系数 α_n 取 0.635. 根据几何关系,求得对核心区混凝土有效约束面积 A_{en} ,即

$$A_{\text{en}} = 0.635A_{xy}. \tag{12}$$

2.2.2 钢板箍间距影响系数 α_s 钢板笼纵横向连接处形成角钢刚度较大,中间刚度小^[11],如图 5 所示. 根据拱作用理论分析,位于箍筋间距中间位置即 *s*/2 处为约束薄弱区,钢板笼对混凝土的约束侧向大于钢筋笼而小于纯钢管. 因此,钢板弱约束区抛物线高度可取 1/8~1/15 的底边长. 箍筋间距对混凝土

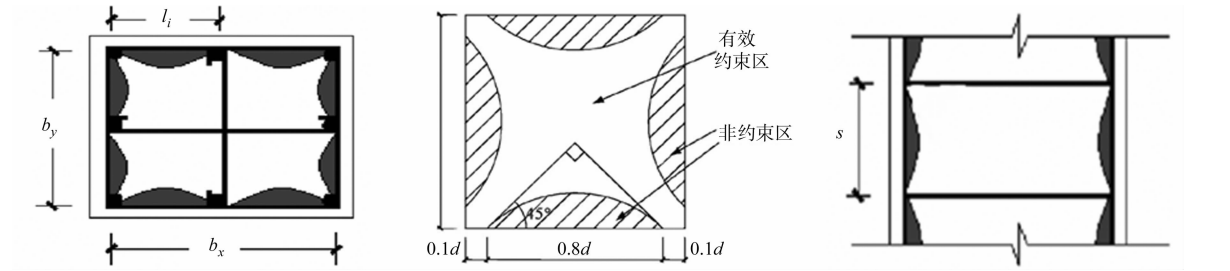


图 3 箍筋对混凝土平面约束
Fig. 3 Stirrup plane confinement on the concretes

图 4 方钢管对混凝土平面约束
Fig. 4 Square tube plane confinement on the concrete

图 5 钢板箍对混凝土立面约束
Fig. 5 Steel hoop facade confinement on the concrete

土约束影响系数 α_s ,取箍筋截面纵向有效约束截面面积与核心约束混凝土截面面积的比值,即

$$A_{\text{es}} = (b_x - \frac{s}{10})(b_y - \frac{s}{10}), \tag{13}$$

$$\alpha_s = A_{\text{es}}/A_{xy}. \tag{14}$$

结合上述公式求出 k_e 为

$$k_e = \alpha_n \times \alpha_s = 0.635 \times [(1 - \frac{s}{10b_x}) \times (1 - \frac{s}{10b_y})]. \tag{15}$$

所以,当钢板笼构件 $b_x=b_y$ 时,约束混凝土有效侧向约束应力为

$$P = k_e \times f_l = 0.635 \times [(1 - \frac{s}{10b_x}) \times (1 - \frac{s}{10b_y})] \times (\lambda_v f_c \times \frac{1}{2}). \tag{16}$$

3 钢板笼约束混凝土短柱极限承载力计算

3.1 极限承载力

根据式(16)解出 *P*,代入式(1)求出核心混凝土抗压强度 *f_{cc}*. 钢板笼混凝土短柱轴心受压极限承载力可分为两部分,即

$$N = N_s + N_c = f'_y A'_s + f'_{cc} A_c. \tag{17}$$

式(17)中:*N_s* 为构件纵向钢板抗压承载力;*N_c* 为钢板约束混凝土抗压承载力;*f'_y* 纵向钢板抗压强度值;*A'_s* 纵向钢板截面积;*f'_{cc}* 为钢板约束混凝土抗压承载力;*A_c* 为核心区混凝土约束面积.

3.2 模型验证

用 4 根钢板笼混凝土短柱进行试验^[12-15],构件截面尺寸(*b*×*h*)为 250 mm×250 mm,钢板笼约束混凝土短柱高度为 750 mm,混凝土强度等级采用 C30,实测强度为 20.7 MPa. 钢板采用强度为 Q235,厚

度为 6 mm,实测强度为 276.7 MPa,具体参数如表 1 所示.表 1 中: a_n 为混凝土保护层厚度; z 为钢板笼混凝土短柱高度;钢板笼以实际加工尺寸为准.

表 1 试验主要参数
Tab.1 Parameters of specimens

试件编号	$b \times h/\text{mm} \times \text{mm}$	a_n/mm	z/mm	s/mm	A_s/mm	λ_v
PCS-1	250×250	25	750	160	1 632	0.095
PCS-2	250×250	25	750	90	1 632	0.169
PCS-3	250×250	25	750	70	1 632	0.218
PCS-4	250×250	25	750	50	1 632	0.305

图 6 为钢板笼变形破坏图.由图 6 可知:钢板中点处刚度较弱,存在弱约束区;角点处刚度大,约束强,变形小.随着核心区混凝土横向变形系数增大到大于钢板笼横向变形系数,钢板笼受到挤压,对核心区混凝土产生约束效应.当荷载接近钢板的屈服荷载时,在开裂荷载的挤压下,钢板笼弱约束区出现外凸变形,随着纵向的变形发展,有些部位出现了近似圆形的破坏截面.

将式(17)计算值与文中试验数据进行比较,结果如表 2 所示.表 2 从核心混凝土抗压强度、构件极限荷载值两方面进行比较分析,其中: δ 为相对误差.结果表明:PCS-1,PCS-2,PCS-4 试验值与计算值较为吻合,误差较小.这是由于混凝土浇筑时不均匀性,钢板笼加工时材料性能产生的允许误差.而 PCS-3* 加载过程中由于施加荷载端出现失衡,试验失败,试验结果值与理论数值偏差较大.因此,文中可取 3 个试验值与钢板笼混凝土短柱承载力计算公式值相对比.

表 2 计算结果与试验数据对比
Tab.2 Comparison between the calculation results and experimental data

试件编号	试验值		按式(17)的计算值		$\delta/\%$
	f_{cc}/MPa	P/kN	f'_{cc}/MPa	P'/kN	
PCS-1	26.210	1 438	26.718	1 476.69	2.69
PCS-2	33.118	1 698	29.595	1 587.07	6.53
PCS-3*	38.671	1 907	31.251	1 650.63	13.44
PCS-4	37.236	1 853	33.932	1 753.47	5.37

4 结论

1) 在拱作用理论的基础上,分析了钢板笼的钢板箍形式、钢板箍间距对有效约束核心区混凝土强度的影响,横向钢板对混凝土的约束与方钢管相似,纵向钢板连接成一个整体形成角钢,约束力比钢筋混凝土强.

2) 钢板笼角部刚度大、约束力强,中间部位刚度小,存在弱约束区,当钢板屈服时,弱约束区最早出现变形.

3) 基于钢管约束混凝土本构关系,通过考虑钢板对混凝土约束的影响,给出了钢板笼约束混凝土短柱轴压承载力计算公式,公式的计算结果与试验数据吻合较好,验证了公式的合理性.

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. Behavior of square concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Materials and Structures, 2011, 44(1): 89-100.



图 6 钢板笼变形图
Fig. 6 Deformation of PCS

[3] 舒赣平,刘小莹,缪巍.配置圆钢管混凝土轴心受压短柱试验研究与承载力分析[J].工业建筑,2010,40(4):100-106.

[4] 张志强,赵均海,张玉芬,等.复合钢管混凝土柱轴压承载力的计算[J].长安大学学报,2010,30(1):67-70.

[5] 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,1989,1(11):2-7.

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

[7] 蔡绍怀.现代钢管混凝土结构[M].北京:人民交通大学出版社,2003:38-39.

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

[9] 李国强,李杰,苏小卒.建筑结构抗震设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2002:143-144.

[10] MANDER J B,PRIESTLEY M J N,PARK R. Theoretical stress-strain behavior for confined concrete[J]. Structural Enineering,1988,114(8):1827-1849.

[11] 湛意雄,曾志兴.钢板开孔对结构性能的影响及其对策[J].低温建筑技术,2013,35(11):44-47.

[12] 李飞.钢板笼混凝土短柱轴压性能试验研究[D].厦门:华侨大学,2012:27-32.

[13] 梁扬滨,曾志兴,陈荣淋,等.钢板笼混凝土短柱轴压性能的数值模拟[J].华侨大学学报:自然科学版,2014,35(1):88-91.

[14] SEZEN H,SHAMSAI M. High-strength concrete columns reinforced with prefabricated cage system[J]. Journal of Structural Engineering,2008,134(5):750-757.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:207-211.

**Bearing Capacity of Prefabricated Cage System for Reinforcing
Concrete Short Columns under Axial Compression**

LIANG Yang-bin, ZENG Zhi-xing, SU Jiang-lin, CHEN Yi-xiong

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

Abstract: Based on the existed concrete constitutive relationship and arch action principle of stirrups confined concrete. The prefabricated cage system ferrule form and spacing constraints concrete bearing capacity are investigated. The formula of prefabricated cage system bearing capacity of axially loaded concrete is proposed, and the calculation results are compared with experimental data. The result shows that the lateral confinement of prefabricated cage system for reinforcing concrete is similar to concrete-filled steel tube, the confinement of angle steel connected longitudinally is strong, and the calculation results agree well to experimental data.

Keywords: prefabricated cage system; short column under axial compression; confined concrete; bearing capacity

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)