

偏心受压 PVC-FRP 管钢筋混凝土柱承载力分析

于峰¹, 黎德光¹, 牛荻涛², 徐国士¹, 程安春¹, 徐琳¹

(1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 对偏心受压PVC-FRP管钢筋混凝土柱破坏机理进行分析, 根据弹性理论, 将PVC-FRP管等效为双向复合材料管, 利用应变协调条件, 得出PVC-FRP管对核心混凝土紧箍力的计算方法. 在此基础上, 根据极限平衡条件, 推导出偏心受压PVC-FRP管钢筋混凝土柱承载力的计算公式. 并将计算值与试验结果进行比较, 验证了理论公式的正确性. 该研究为复杂应力状态下PVC-FRP管钢筋混凝土柱的受力性能分析提供理论依据.

关键词: PVC-FRP管钢筋混凝土柱; 偏心受压; 承载力; 弹性理论; 极限平衡理论

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2014)05-0660-05

目前, 工程中应用最广泛的是钢筋混凝土结构, 但由于钢筋混凝土结构具有自重大、承载力低、施工过程复杂等缺点, 限制其在大型土木工程中的应用. 因此, 研究各种结构材料的优化组合, 形成更为经济、合理的组合结构或混合结构, 已经成为研究热点问题. 为此国内外学者对钢管混凝土结构开展研究, 结果表明, 钢管混凝土结构具有良好的力学性能^[1-3], 并且越来越被广泛应用于实际工程中. 但钢管在潮湿环境或腐蚀环境中易发生锈蚀, 使得钢管混凝土结构存在耐久性问题. 由于FRP具有耐腐蚀、强度高、质量轻等优点, 在土木工程中得到较为广泛应用. FRP在实际工程中的应用主要分为两种: ①应用于建筑物进行修复和加固, 研究表明, FRP加固混凝土显著提高了混凝土柱的承载力和延性^[4-5]. ②应用于新建结构中, 如FRP筋, 用以在恶劣的环境下代替普通钢筋, 或在FRP管内浇筑混凝土, 形成FRP管组合结构^[6-7].

虽然FRP管混凝土组合柱在试验中取得理想的试验结果, 但因FRP材料的价格高和性能不稳定, 在实际工程中应用很少. 为解决钢管混凝土结构耐久性差, FRP管混凝土结构造价高等缺点, 于峰^[8]提出PVC-FRP管钢筋混凝土结构, 该结构具有承载力高、延性和耐久性好、施工方便、质量轻等优点. 文献[9]对轴压和偏压作用下PVC-FRP管混凝土柱进行试验研究, 分析FRP条带环箍间距、轴向配筋、长细比、偏心距等因素对PVC-FRP管混凝土柱的破坏形态、承载力和变形的影响, 提出轴压和偏压作用下PVC-FRP管钢筋混凝土柱承载力计算公式, 但公式未考虑PVC-FRP管的紧箍力对构件承载力的影响.

因此, 在试验研究基础上, 根据应变协调条件, 首先得出PVC-FRP管对核心混凝土紧箍力计算方法, 并以极限平衡理论为基础, 推导出偏心受压PVC-FRP管钢筋混凝土柱承载力的计算公式, 并将计算值与试验结果进行比较, 验证了公式的正确性.

1 试验概况

文献[9]共进行24根偏心受压PVC-FRP管混凝土柱试验. 所有试件的直径均为200 mm, 试件的长度为500 mm. 每根试件配置8根直径为10 mm钢筋, 配筋率为1.8%, 混凝土抗压强度标准值为28.6 MPa, PVC管外径为200 mm, 壁厚为7.8 mm, 抗拉强度为62 MPa; FRP条带环向抗拉强度为3 612 MPa, 条带宽度均为20 mm, 粘贴3层, 厚度为0.33 mm. 试验主要研究FRP条



E20-Cs20



E40-Cs20

图1 偏压 PVC-FRP 管混凝土柱破坏形态

Fig.1 Failure mechanism of PVC-FRP confined concrete column under eccentric compression

收稿日期: 2014-05-12

修改稿日期: 2014-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278403, 51008001); 安徽省自然科学基金项目 (1208085QE88); 安徽工业大学研究生创新基金项目 (2011017, 2013044)

作者简介: 于峰(1980-), 男, 博士, 教授, 主要从事 FRP 在土木工程中的应用、组合结构的研究. E-mail: yufeng2007@126.com

带环箍间距 (20 mm、30 mm、40 mm、50 mm、60 mm)和偏心距(20 mm、40 mm)对PVC-FRP管混凝土柱力学性能的影响. 图1为文献[9]部分PVC-FRP管混凝土柱的典型破坏形态, 结果表明, PVC-FRP管的约束显著提高偏心受压构件的承载力和延性, 构件破坏时, 受压区和受拉区钢筋屈服, 受压区的PVC管和混凝土被压碎, FRP条带被拉断, PVC-FRP管与核心混凝土之间无滑移现象.

2 PVC-FRP 管对核心混凝土紧箍力的计算方法

根据弹性理论, 可以将 PVC-FRP 管等效为双向复合材料管, PVC-FRP 管钢筋混凝土结构在偏心受压下 PVC 管和混凝土直接承受轴力, 而外包的 FRP 主要起紧箍作用. 在加载初期, 由于混凝土的泊松比小于 PVC 管的泊松比, PVC 管和混凝土单独承受轴力且两者之间没有紧箍作用. 当荷载达到非约束混凝土抗压强度时, 由于内部混凝土的膨胀, 在 PVC-FRP 管和核心混凝土之间会产生紧箍力. 对于轴压短柱, 随着竖向荷载的增加, 紧箍力不断增加; 对于长柱和偏压柱, 随着荷载的增加, 混凝土内部渐渐产生微裂纹后, 其径向应变大于 PVC 管的径向应变, 此时 PVC 管处于环向拉应力和径向压力状态, 而 FRP 处于环拉应力状态, 核心混凝土处于荷载、环向和径向受压的三向应力状态. 随着长细比和偏心率的增加, 紧箍力不断减小. PVC-FRP 管钢筋混凝土中由于受压区紧箍力是变化的, 处于三向应力状态下核心混凝土的竖向承载力也是变化的. 考虑到这一实际情况, 将使 PVC-FRP 管钢筋混凝土承载力计算非常复杂. 为了简化计算, 引入等效紧箍力的概念, 即对整个受压区取一个等效紧箍力. 为得出偏心受压构件的等效紧箍力, 首先推导轴心受压构件紧箍力的计算公式 (PVC-FRP 管钢筋混凝土柱受力如图 2 所示.)

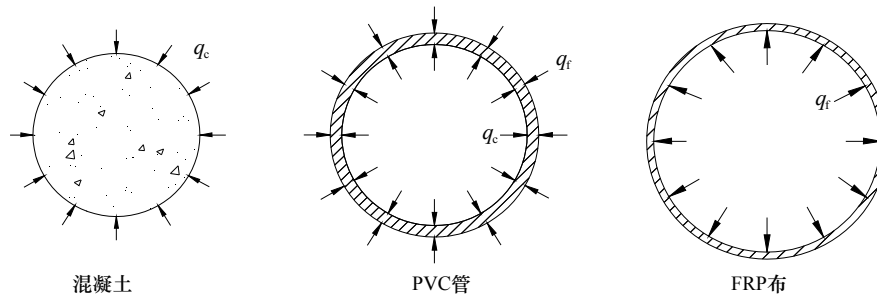


图2 PVC-FRP管钢筋混凝土构件受力简图

Fig.2 Schematic of PVC-FRP confined concrete column under compression

根据弹性力学^[10]拉梅公式, 轴心受压 PVC-FRP 管钢筋混凝土径向压应力和环向拉应力计算公式分别为

$$\sigma_r = -\frac{b^2/\rho^2 - 1}{b^2/a^2 - 1}q_a - \frac{1 - a^2/\rho^2}{1 - a^2/b^2}q_b \quad (1)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{b^2/\rho^2 + 1}{b^2/a^2 - 1}q_a - \frac{1 + a^2/\rho^2}{1 - a^2/b^2}q_b \quad (2)$$

式中: σ_r 为径向压应力, σ_φ 为环向拉应力, a 为 PVC-FRP 管内径, b 为 PVC-FRP 管外径, q_a 为 PVC-FRP 管内压力, q_b 为 PVC-FRP 管外压力, ρ 为试件任意位置的半径.

PVC-FRP 管为薄壁管, 径向压应力 σ_{pj} 远小于环向拉应力 σ_{ph} 和竖向压应力 σ_{pz} , 故将 σ_{pj} 忽略不计.

根据拉梅公式有:

$$\sigma_{ph} = \frac{R}{t}(q_c - q_f) \quad (3)$$

$$\sigma_{cj} = \sigma_{ch} = q_c \quad (4)$$

$$\sigma_{fh} = \frac{R + t_p}{t_f}q_f \quad (5)$$

式中: σ_{cj} 为核心混凝土径向压应力, σ_{ch} 、 σ_{fh} 分别为核心混凝土对 PVC 管的压应力和 FRP 条带的环向拉应力, q_c 为 PVC-FRP 管对核心混凝土的约束应力, q_f 为 FRP 条带对 PVC 管的约束应力, t_p 、 t_f 分别

为PVC管的厚度和FRP条带的厚度, R 和 t 为PVC-FRP管的半径和厚度.

根据胡克定理, 得到核心混凝土的应变:

$$\varepsilon_{cz} = \frac{1}{E_c}(\sigma_{cz} - 2\nu_c q_c); \quad \varepsilon_{cj} = \frac{1}{E_c}[q_c - \nu_c(\sigma_{cz} + q_c)] \quad (6)$$

PVC-FRP管的应变为

$$\varepsilon_{pz} = \frac{1}{E_p}[\sigma_{pz} - \nu_p(\sigma_{pj} + \sigma_{ph})] \quad (7)$$

$$\varepsilon_{ph} = \frac{1}{E_p}[\sigma_{ph} - \nu_p(\sigma_{pz} + \sigma_{pj})] \quad (8)$$

$$\varepsilon_{pj} = \frac{1}{E_p}[\sigma_{pj} - \nu_p(\sigma_{pz} + \sigma_{ph})] \quad (9)$$

FRP的环向拉应变为

$$\varepsilon_{fh} = \frac{\sigma_{fh}}{E_f} \quad (10)$$

式中: ε_{cz} 、 ε_{cj} 分别为核心混凝土轴向压应变和径向拉应变; ε_{pz} 、 ε_{pj} 、 ε_{ph} 分别为PVC管轴向压应变、径向和环向拉应变; ε_{fh} 为FRP的环向拉应变; ν_c 、 ν_p 分别为混凝土和PVC-FRP管弹性泊松比.

根据轴向和径向变形协调条件, 可得:

$$\varepsilon_{cj} = \varepsilon_{pj}; \quad \varepsilon_{fh} = \varepsilon_{ph}; \quad \varepsilon_{pz} = \varepsilon_{cz} \quad (11)$$

根据构件静力平衡条件, 可得构件承载力为

$$N = \sigma_{cz} A_c + \sigma_{pz} A_p \quad (12)$$

将公式(6)、(7)、(8)、(9)、(10)代入公式(11)和(12)得出紧箍力 q_c 、 q_f 的表达式分别为

$$q_c = \frac{[(\nu_c - \nu_p) + B_{fp} \nu_c (1 - \nu_p)^2] \sigma}{(4\nu_c \nu_p + \nu_c - 3) + 2(B_{fc} + B_{pc})(2\nu_c^2 + \nu_c - 1) + [B_{cp} + B_{fp}(1 - \nu_c)](\nu_p^2 - 1)} \quad (13)$$

$$q_f = \frac{[B_{fc}(1 - \nu_c - 2\nu_c^2)\nu_p + \nu_c B_{fp}(1 - \nu_p^2)] \sigma}{(4\nu_c \nu_p + \nu_c - 3) + 2(B_{fc} + B_{pc})(2\nu_c^2 + \nu_c - 1) + [B_{cp} + B_{fp}(1 - \nu_c)](\nu_p^2 - 1)} \quad (14)$$

$$\text{令 } B_{fc} = \frac{E_f t_f}{E_c R}; \quad B_{fp} = \frac{E_f t_f}{E_p t_p}; \quad B_{cp} = \frac{E_c R}{E_p t_p} \quad (15)$$

偏心受压PVC-FRP管钢筋混凝土的等效紧箍力与偏心率有关, 轴心受压和偏心受压的紧箍力关系可以根据文献[11]来确定.

$$\text{当 } 0 \leq e/r_c \leq 0.6 \text{ 时: } \frac{q'_c}{q_c} = \sqrt{1.96 - \left(\frac{e}{r_c}\right)^2} \quad (16)$$

$$\text{当 } 0.6 < e/r_c \leq 1 \text{ 时: } \frac{q'_c}{q_c} = 3\left(1 - \frac{e}{r_c}\right) \quad (17)$$

式中: q'_c 为偏心受压等效紧箍力.

3 偏心受压构件承载力推导

3.1 基本假定

当PVC-FRP管钢筋混凝土柱达到极限承载力时, PVC-FRP管和受压区混凝土之间的紧箍力最大(如图3所示, 图中阴影部分为混凝土受压区). 若外包FRP条带断裂, 环向约束消失, 试件发生破坏, 所以可以定义FRP环向约束消失时柱子达到极限承载力. 为了简化计算, 做如下假定: ① 假设PVC管为理想弹塑性

体. ② 混凝土的纵向应力与紧箍力有线性关系, 不计受拉区混凝土作用. ③ FRP可作薄膜处理, 只承受环向的拉应力. ④ 钢筋应力应变关系采用完全弹塑性模型. ⑤ FRP与PVC管之间、钢筋与混凝土、PVC与混凝土之间粘结良好, 无滑移.

3.2 计算公式推导

根据以上假定可以得出以下公式, PVC管的轴向压应力为

$$\sigma_{pz} = -\frac{q_c'}{2} + \sqrt{-3q_c'^2 + f_p^2} \quad (18)$$

$$\sigma_{cz} = f_{ck} + q_c' \quad (19)$$

$$\sigma_{cf} = E_{cf} \varepsilon_{cf} \quad (20)$$

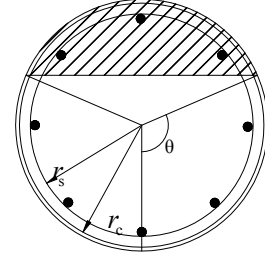


图3 偏心受压构件应力分布图

Fig.3 Stress under eccentric compression

根据平衡条件得出偏压计算公式:

$$N = N_c + \sigma_{pz} A_p - N_p + N_s \quad (21)$$

$$Ne = M_c + M_p + M_s \quad (22)$$

$$N_c = 2 \int_0^\theta \sigma_c dA_c = \sigma_c r_c^2 (\theta - \cos \theta \sin \theta) \quad (23)$$

$$N_p = 2 \int_\theta^\pi (f_p + \sigma_{pz}) dA_p = 2(f_p + \sigma_{pz}) r_c t (1 + \frac{\alpha}{4})(\pi - \theta) \quad (24)$$

$$N_s = (\alpha - \alpha_t) f_y A_s \quad (25)$$

$$N = 2\pi r_c t_p (1 + \frac{a}{4}) \sigma_{pz} - 2(f_p + \sigma_{pz}) (1 + \frac{a}{4}) r_c t_p (\pi - \theta) + \sigma_c r_c^2 (\theta - \cos \theta \sin \theta) + f_y A_s (\alpha - \alpha_t) \quad (26)$$

$$M_c = \int_0^\theta N_c r_c \cos \theta d\theta = \frac{2}{3} \sigma_c r_c^3 \sin^3 \theta \quad (27)$$

$$M_p = \int_\theta^\pi N_p (r_c + \frac{t_p}{2}) \cos \theta d\theta = 2(f_p + \sigma_{pz}) r_c 2t_p (1 + \frac{a}{4})^2 \sin \theta \quad (28)$$

$$M_s = f_y A_s r_s \frac{\sin \theta + \sin \left(2\theta - \frac{3}{4} \pi \right)}{\pi} \quad (29)$$

$$Ne = 2(f_p + \sigma_{pz}) r_c 2t_p (1 + \frac{a}{4})^2 \sin \theta + \frac{2}{3} \sigma_c r_c^3 \sin^3 \theta + f_y A_s r_s \frac{\sin \theta + \sin \left(2\theta - \frac{3}{4} \pi \right)}{\pi} \quad (30)$$

对应每个偏心距 e 即可得到对应的 θ 值, 然后根据公式(26)和公式(30)得到构件的极限承载力和极限弯矩.

4 试验验证

用本文所推导的式来计算极限承载力 N_u 和极限弯矩 M_u , 试验极限承载力 N_e 和极限弯矩 M_e 为文献[9]给出的结果. 计算值和试验结果如表1所示. 从表1中看出, N_e/N_u 平均值为1.011, 均方差为0.024, M_e/M_u 平均值为1.046, 均方差为0.050, 计算值与试验值吻合较好, 推导偏心受压PVC-FRP管钢筋混凝土柱承载力计算公式具有较高计算精度.

表1 公式(26)和公式(30)计算结果与文献 [9] 试验结果比较
Tab.1 The comparison between the calculating values of Eq.(26), (30) and experimental data [9]

试件编号	N_e/kN	N_u/kN	N_e/N_u	$M_e/\text{kN}\cdot\text{m}$	$M_u/\text{kN}\cdot\text{m}$	M_e/M_u
s20-1	1 833.00	1 811.40	1.012	47.40	44.57	1.063
E20-Cs20-2	1 725.60	1 811.40	0.953	41.84	44.57	0.939
E20-Cs30-1	1 626.00	1 585.60	1.025	40.88	40.68	1.005
E20-Cs30-2	1 644.70	1 658.73	0.992	41.30	40.68	1.015
E20-Cs40-1	1 499.00	1 459.50	1.027	38.08	36.47	1.044
E20-Cs40-2	1 536.30	1 459.50	1.053	38.75	36.47	1.063
E20-Cs50-1	1 421.30	1 392.60	1.021	34.50	32.45	1.063
E20-Cs50-2	1 485.70	1 392.60	1.067	36.90	32.45	1.137
E20-Cs60-1	1 314.30	1 398.74	0.940	33.53	31.63	1.060
E20-Cs60-2	1 438.70	1 398.74	1.029	36.20	31.63	1.144
E40-Cs20-1	1 372.30	1 342.24	1.022	62.32	59.53	1.047
E40-Cs20-2	1 330.53	1 342.24	0.991	60.21	59.53	1.011
E40-Cs30-1	1 258.10	1 238.15	1.016	57.21	54.56	1.049
E40-Cs30-2	1 273.40	1 238.15	1.028	57.65	54.56	1.057
E40-Cs40-1	1 191.20	1 158.65	1.028	54.27	51.57	1.052
E40-Cs40-2	1 102.20	1 158.65	0.951	49.92	51.57	0.968
E40-Cs50-1	1 117.20	1 077.76	1.037	50.93	48.74	1.045
E40-Cs50-2	1 093.70	1 077.76	1.015	49.05	48.74	1.006
E40-Cs60-1	996.70	1 042.56	0.956	44.85	43.74	1.025
E40-Cs60-2	1 092.90	1 042.56	1.048	49.62	43.74	1.134

5 结论

(1) 根据弹性理论, 将 PVC-FRP 管等效为双向复合材料管, 利用变形协调条件, 将等效紧箍力的概念引入到 PVC-FRP 管钢筋混凝土构件中, 推导出轴心受压 PVC-FRP 管对核心混凝土紧箍力的计算方法, 为偏压 PVC-FRP 管钢筋混凝土构件的力学性能研究提供理论依据。

(2) 根据构件极限平衡条件, 推导出偏心受压 PVC-FRP 管钢筋混凝土柱承载力的计算模型, 该模型不仅形式简单, 且具有很高的计算精度。

参考文献 References

[1] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
CAI Shaohuai. Modern steel tube confined concrete structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[2] 胡少伟. 钢-混凝土组合结构[M], 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
HU Shaowei. Composite structure of steel and concrete[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2005.

[3] 丁发兴, 余志武. 圆钢管混凝土轴压短柱受力机理影响因素分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2006, 3(1): 6-11.
DING Faxing, YU Zhiwu. Parameters analysis of the behavior of concrete filled circular steel tubular stub columns[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(1): 6-11.

[4] 赵海东, 赵鸣. 碳纤维布加固钢筋混凝土圆柱的轴心受压性能试验研究[J]. 建筑结构, 2000, 30(7): 27-30.
ZhAO Haidong, ZhAO Ming. Test study on mechanical performance of strength concrete column confined by CFRP under axial load[J]. Building Structure, 2000, 30(7): 27-30.

[5] 赵树红, 叶列平. 碳纤维布加固钢筋混凝土柱受剪承载力性能试验研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(2): 12-15.
ZhAO Shuhong, YE Lieping. Experimental research on shear behaviors for concrete column strengthened with CFRP[J]. Industrial Construction, 2000, 30(2): 12-15.

[6] MIRMIRAN A, SHAHAWY M. Behavior of concrete columns confined by fiber composites[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(5): 583-590.

[7] 曹双寅, 敬登虎, 孙宁. 碳纤维布约束加固混凝土偏压柱的试验研究与分析[J]. 东南大学学报, 2006, 39(8): 28-30.
CAO Shuangyin, JING Denghu, SUN Ning. Experimental study and analysis of concrete eccentrically loaded column bonded with CFRP[J]. Journal of Southeast University, 2006, 39(8): 28-30.

(下转第0670页)